LAS PICEAS
(*Picea*, PINACEAE)
DE MÉXICO

LAS PICEAS (*Picea*, PINACEAE) DE MÉXICO

México

2022

Primera edición: 2022

D.R.© 2022
ISBN – Versión impreso: 978-607-8383-38-2
ISBN – Versión digital: 978-607-8383-36-8

Impreso en México – *Printed in Mexico*

Título: Las Piceas (*Picea*, Pinaceae) de México

Forma de citar este libro:

Libro completo: González Elizondo, M.S. y C. Wehenkel (Eds.). Las Piceas (*Picea*, Pinaceae) de México. Comisión Nacional Forestal. México. 166 p.

Capítulos: Autores del capítulo. 2022. Nombre del capítulo, páginas, en: González Elizondo, M.S. y C. Wehenkel (Eds.). Las Piceas (*Picea*, Pinaceae) de México. Comisión Nacional Forestal. México. 166 p.

Este trabajo ha sido revisado por pares.

Revisores externos:

Dr. Eduardo Estrada Castillón
Dr. José Ángel Prieto Ruiz

Los coautores son responsables del contenido de sus capítulos.

Derechos Reservados©: Esta obra o sus partes pueden ser reproducidas, almacenadas en sistemas de información, transmitidas o traducidas para fines no lucrativos, siempre que se otorguen los créditos correspondientes y se incluya la cita. Revisores de la CONAFOR: Gerencia de Desarrollo y Transferencia de Tecnología y Subgerencia de Recursos Genéticos Forestales

PRÓLOGO

Picea constituye un género de la familia Pinaceae con 35 especies reconocidas de importancia ecológica, varias de ellas de uso comercial maderable y ornamental. En México crecen tres especies de *Picea* endémicas y de distribución relictual: *P. chihuahuana* en Chihuahua y Durango, *P. martinezii* en Nuevo León y *P. mexicana* en Coahuila y Chihuahua.

Las piceas mexicanas tienen gran valor ambiental, alto potencial económico y son interesantes desde el punto de vista científico. Además, tienen estatus de conservación dada su distribución restringida de tipo relictual o paleoendémica. Debido a que sus poblaciones son pequeñas y aisladas, las piceas de México son particularmente vulnerables a los efectos de disturbio y el cambio climático.

Como parte de los resultados del proyecto CONAFOR-CONACYT-2017-4 "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática", en este trabajo se presenta una sinopsis de la información disponible sobre las tres especies de *Picea* conocidas para México. Se presenta un análisis integral de la información generada hasta la fecha para este grupo en el país.

Este compendio se basa en los datos obtenidos durante el proyecto y en una revisión de diversas fuentes. Se presenta una panorámica general del conocimiento de las piceas mexicanas, con datos sobre su taxonomía, distribución, aspectos ecológicos, censos y dinámica poblacional, estado de conservación, genética, producción y manejo. El compendio aquí integrado guiará futuras investigaciones y servirá de apoyo para los programas de manejo de este importante recurso.

Dr. Javier López Upton

Colegio de Postgraduados

AGRADECIMIENTOS

Damos las gracias a los habitantes y dueños de los predios estudiados por su apoyo durante la realización de los muestreos y por la información aportada. Al Dr. Eduardo Estrada Castillón y Dr. José Ángel Prieto Ruiz por la cuidadosa revisión del manuscrito. Igualmente, recibimos valiosas sugerencias para mejorar el documento derivadas de la revisión llevada a cabo en la CONAFOR. Al Dr. Jesús González Gallegos y Dra. Martha González Elizondo por discusiones sobre aspectos taxonómicos y nomenclaturales y al Biol. José Guadalupe Sánchez de la Peña por los interesantes datos históricos y de distribución de *Picea mexicana*. A la M. en C. Norma L. Piedra Leandro por la elaboración de los mapas de distribución y al Dr. Jorge A. Tena Flores y la Ing. Violeta Sariñana por apoyo con el formato. La CONAFOR y el CONACYT financiaron el proyecto de donde se deriva este trabajo (CONAFOR-CONACYT-2017-4).

CONTENIDO

PRÓLOGO 4

AGRADECIMIENTOS 5

AUTORES 8

RESUMEN 10

ABSTRACT 10

INTRODUCCIÓN 11

CAPÍTULO 1 13

TAXONOMÍA DE LAS PICEAS MEXICANAS

CAPÍTULO 2 28

DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA Y ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LAS PICEAS MEXICANAS

CAPÍTULO 3 56

GENÉTICA DE LAS PICEAS EN MÉXICO

CAPÍTULO 4 69

INDICADORES REPRODUCTIVOS DE *Picea martinezii* T.F. PATT. Y *Picea mexicana* Martínez

CAPÍTULO 5 89

ENSAYO DE PROCEDENCIAS DE LAS PICEAS MEXICANAS EN CONDICIONES DE VIVERO: TRES ESPECIES AMENAZADAS POR LA VARIACIÓN CLIMÁTICA**

CAPÍTULO 6 95

CENSO, ESTRUCTURA DEMOGRÁFICA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE DOS ESPECIES DE *Picea*

CAPÍTULO 7 109

VARIABLES DASOMÉTRICAS, TOPOGRÁFICAS Y ESTRUCTURA EN POBLACIONES DE DOS ESPECIES DEL GÉNERO *Picea*

CAPÍTULO 8 132

ANÁLISIS DEL INCREMENTO CORRIENTE ANUAL Y DEL INCREMENTO MEDIO ANUAL EN SIETE POBLACIONES DE *Picea*

CAPÍTULO 9 153

PROPAGACIÓN, PRODUCCIÓN DE PLANTA EN VIVERO Y PLANTACIONES DE PICEAS MEXICANAS

AUTORES

Dr. Christian Wehenkel, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. wehenkel@ujed.mx

Dr. J. Jesús Vargas Hernández, Colegio de Posgraduados, Montecillos, Edo. México, C.P. 56230, México. jjesus.vargashernandez@gmail.com

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero, Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Mich., C.P. 58030, México. csaenzromero@gmail.com

Dr. Celestino Flores López, Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coah., C.P. 25315, México. cele64@gmail.com

Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores, CIIDIR Durango, Instituto Politécnico Nacional, Durango, Dgo., C.P. 34234, México. jescobarf@ipn.mx

Dra. María del Socorro González Elizondo, CIIDIR, Instituto Politécnico Nacional, Durango, Dgo., C.P. 34234, México. herbario_ciidir@yahoo.com.mx

Dr. José Ciro Hernández Díaz, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. jciroh@ujed.mx

Dra. Carmen Zulema Quiñones Pérez, Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Guadiana, Durango, Dgo., C.P. 34371, México. zulema.qp@vguadiana.tecnm.mx

Dr. Artemio Carrillo-Parra, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. acarrillo-parra@ujed.mx

M. en C. Eduardo Mendoza Maya, Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. edumm1985@gmail.com

M. en C. Sergio L. Simental Rodríguez, Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. sergioleonelsimental@hotmail.com

M. en C. Óscar Alfredo Díaz-Carrillo, Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. oscardiazcarrillo@icloud.com

Ing. Guadalupe Estefanía Rivas Del Bosque, Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coah., C.P. 25315, México. estefaniarivasdelbosque123@gmail.com

M. en C. José Marcos Torres Valverde, Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, Dgo., C.P. 34120, México. a271917@uach.mx

Dr. José Villanueva Díaz, CENID-RASPA, INIFAP, Gómez Palacio, Dgo., C.P. 35140, México. villanueva.jose@inifap.gob.mx

RESUMEN

Picea es el género de mayor afinidad boreal entre los grupos arbóreos de México. Está representado en el país por tres especies: *Picea chihuahuana* (Chihuahua y Durango), *P. martinezii* (Nuevo León) y *P. mexicana* (Coahuila y Chihuahua). Las piceas son de gran valor ecológico por ocupar partes altas de cuencas y tienen un alto interés científico por su distribución relictual. Son particularmente vulnerables al calentamiento del clima debido a su distribución restringida, poblaciones pequeñas y preferencia por sitios altos y húmedos. En este trabajo se presenta una panorámica general de su conocimiento en cuanto a taxonomía, distribución, aspectos ecológicos, estado de conservación, genética, censos, estructura poblacional, y manejo *in situ* y *ex situ*. Esta revisión incluye los resultados del proyecto "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática" (CONAFOR-CONACYT-2017-4). Sobre esta síntesis pueden guiarse futuras investigaciones sobre múltiples huecos de información que aún persisten, por ejemplo, su ecología, dinámica de poblaciones, relaciones micorrícicas, patógenos, y aprovechamiento a través de cultivo. Estos y otros temas representan ventanas de oportunidad para alcanzar una comprensión cabal sobre las piceas mexicanas y optimizar los programas de manejo de estos magníficos árboles.

ABSTRACT

Among the Mexican trees, *Picea* (spruce) is the genus with the stronger boreal affinity. There are three species in Mexico, all of them paleoendemic, relic from the Holocene: *Picea chihuahuana* (in Chihuahua and Durango), *P. martinezii* (Nuevo Leon), and *P. mexicana* (Coahuila and Chihuahua). Spruces in Mexico have high ecological value for being part of upper watersheds, and a particular scientific interest as being relics in small populations. Because their restricted distribution, small populations and preference for high and humid places, Mexican spruces are particularly vulnerable to extreme climate events. Here we present an overview of their taxonomy, distribution, ecology, conservation status, population structure, genetics, and *in situ* and *ex situ* management. The review includes the results of the project "Demographic changes, reproduction and status of natural populations of *Picea mexicana* Martínez and *Picea martinezii* Patterson in Mexico: two species susceptible to climatic variability events" (CONAFOR-CONACYT-2017-4). This synthesis can guide future research and help to identify information gaps, e.g., on their ecology, population dynamics, mycorrhizal relations, pathogens, and planting. These and other topics are windows of opportunity to reach a full understanding on the Mexican spruce and improve the management and conservation of those magnificent trees.

INTRODUCCIÓN

El género *Picea* A. Dietr. (Pinaceae) está representado en México por tres especies: *Picea chihuahuana* Martínez, *P. martinezii* T.F. Patt. y *P. mexicana* Martínez (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014). Estos árboles se conocen con los nombres comunes de picea, pícea y pinabete o, en algunos sitios, como abeto, cahuite, ciprés, guayame y guayamé, nombres compartidos con otras coníferas mexicanas como los abetos (*Abies* sp.), el cahuite o pinabete (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), e incluso con algunos pinos (*Pinus* sp.). En inglés son conocidas como spruce.

Las piceas mexicanas tienen alto valor ambiental y potencial económico, además de ser interesantes desde el punto de vista científico y tener estatus de conservación debido a su distribución restringida de tipo relictual o paleoendémica (organismos supervivientes de otras épocas en que presentaban distribución más amplia). Sin embargo, precisamente debido a que sus poblaciones son pequeñas y aisladas, las piceas mexicanas son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático. Su hábitat potencial ha ido declinando desde el Último Máximo Glacial (hace unos 22,000 años) (Jaramillo-Correa *et al.,* 2006) y actualmente su vulnerabilidad se ve incrementada debido tanto a actividades humanas como a cambios ambientales (Ledig *et al*., 2010; Pinedo-Álvarez *et al.,* 2019).

El presente trabajo es parte de los resultados del proyecto CONAFOR-CONACYT-2017-4 "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática". Es una sinopsis de la información disponible sobre las tres especies de *Picea* que se conocen para México, donde se integra la información generada hasta ahora para este grupo. El compendio se basa en los datos generados durante el proyecto y se complementa con la recopilación de la información disponible en diversas fuentes: publicaciones en libros y en revistas científicas, trabajos de tesis, bases de datos, sitios web y registros en herbarios, arboretos, jardines botánicos y viveros, así como en información recabada de comunicaciones con propietarios de las tierras, trabajo de campo y experiencias *in situ* y *ex situ* sobre las tres especies.

Con la participación de 15 especialistas de siete instituciones mexicanas, se presenta una panorámica general del conocimiento de las piceas mexicanas, incluyendo datos sobre su taxonomía, distribución, aspectos ecológicos, genética, estructura poblacional, estado de conservación, y manejo. Sobre esta información pueden guiarse futuras investigaciones sobre estos árboles e ir abordando los huecos de información que persisten: aspectos sobre sus patógenos, relaciones micorrícicas o relaciones con el resto de la flora, entre otros. Estos y otros temas representan ventanas de oportunidad para alcanzar una comprensión cabal sobre las piceas mexicanas y mejorar los programas de manejo de este importante recurso.

REFERENCIAS

Gernandt, D.S. y J.A. Pérez-de la Rosa. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. Revista Mexicana de Biodiversidad 85: S126-S133.

Jaramillo-Correa, J.P., J. Beaulieu, F.T. Ledig and J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. Journal of Molecular Ecology 15(10): 2787-2800.

Ledig, F.T., G.E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero and C. Flores-López. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. American Journal of Botany 97: 970-987.

Pinedo-Alvarez, C., M. Renteria-Villalobos, V. Aguilar-Soto, J.H. Vega-Mares, A. Melgoza-Castillo. 2019. Distribution dynamics of *Picea chihuahuana* Martínez populations under different climate change scenarios in Mexico. Global Ecology and Conservation 17, January 2019, e00559. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00559

CAPÍTULO 1

TAXONOMÍA DE LAS PICEAS MEXICANAS

M. Socorro González Elizondo[1]

[1] CIIDIR, Instituto Politécnico Nacional, Durango, México.
herbario_ciidir@yahoo.com.mx

1.1 El género *Picea*

Picea A. Dietr. es un género de unas 35 especies con distribución holártica, es decir, de las regiones templadas y frías del hemisferio norte. Está bien representado en Eurasia y en Norteamérica (Debreczy y Rácz, 2011). Es parte de la familia Pinaceae, y su relación más estrecha es con los pinos (*Pinus*), aunque morfológicamente se asemeja más a los abetos u oyameles (*Abies*) y al cahuite o pinabete (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) por la forma de sus hojas y conos y por sus afinidades ecológicas. De *Abies* difiere en tener los conos colgantes, no erectos ni restringidos a la parte superior de la copa, mientras que de *Pseudotsuga* se distingue por tener conos cilíndricos con escamas sin brácteas evidentes (en *Pseudotsuga menziesii* los conos son elípticos y cada escama tiene una bráctea trilobada que sobrepasa a la escama). Por varias décadas, las piceas se consideraron como parte de *Abies*, hasta que Dietrich (1824) reconoció el género *Picea*.

Las piceas empezaron a divergir de los pinos desde el Jurásico Inferior, hace casi 180 millones de años y su mayor diversificación ocurrió en el Mioceno y Plioceno, y solo unas pocas especies se separaron más recientemente, en el Pleistoceno (Lockwood *et al.,* 2013). En México, el género tuvo una distribución más amplia durante el Mioceno, cuando llegó hasta el Istmo de Tehuantepec (Graham, 1976) y en el Pleistoceno, cuando hubo poblaciones en el centro del país (Rzedowski, 1983). En el norte, *Picea* ocupaba menores elevaciones que las actuales (Ortega-Rosas *et al.,* 2008), pero a principios del Holoceno, al incrementarse la insolación en el verano y darse condiciones más cálidas y secas, pasó a ocupar mayores elevaciones y se refugió en cañadas protegidas de la insolación (Van Devender *et al.,* 1987; Ledig *et al.,* 1997). *Picea chihuahuana* se ha retraido 500 km hacia el norte en los últimos 8,000 años (Jaramillo-Correa *et al.,* 2006).

En América, *Picea* se distribuye desde el Círculo Polar Ártico hasta el sur de Durango y el sur de Nuevo León, en áreas montañosas de clima húmedo y subhúmedo. En México está representado por tres especies: *Picea chihuahuana* Martínez, *P. martinezii* T.F. Patt.

y *P. mexicana* Martínez, lo que representa 8% del total mundial (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014). Todas son endémicas al país y tienen estatus de conservación (SEMARNAT, 2010).

Las tres especies mexicanas forman parte de un mismo clado, donde también se ubican las otras especies norteamericanas, con excepción de la más primitiva, *P. breweriana* S. Watson (Lockwood *et al.,* 2013).

Las piceas de las zonas boreales en Norteamérica y Eurasia son de gran importancia económica como árboles maderables y para pulpa de papel; su madera fuerte y ligera se utiliza en construcción y hace décadas se llegó a usar incluso para construcción de aviones (Rushforth, 1986). Algunas especies se emplean como árboles de navidad, de otras se obtienen resinas y algunas tienen incluso usos medicinales. En cuanto a las tres especies mexicanas, tienen un alto valor ambiental por proveer servicios ecológicos de protección de suelo y captación de carbono al formar parte de la vegetación de parte alta y media de cuencas y además poseen potencial económico como árboles de navidad y de ornato. Por otra parte, son de gran interés desde el punto de vista científico por su distribución restringida de tipo relictual.

Picea A. Dietr.

Son árboles perennifolios de copa cónica a cónica columnar, a veces muy angosta, de corteza delgada en árboles jóvenes a gruesa y rugosa después. Las ramas son verticiladas, horizontales, o las superiores algo ascendentes y las inferiores descendentes; ramillas muy rugosas debido a las prominencias (llamadas pulvinos) que dejan las bases de las hojas. Las yemas son ovoides con ápice redondeado a agudo, a veces resinoso. Hojas sin vaina, solitarias, dispuestas en espiral y con frecuencia algo dirigidas hacia el ápice de las ramillas, rígidas, de sección más o menos cuadrangular o algo comprimidas, generalmente con ápice punzante, sésiles sobre una base alargada y decurrente sobre la ramilla, con 1 o 2 canales resiníferos. Las hojas persisten hasta 10 años sobre las ramillas, pero en el material seco se desprenden fácilmente. Son plantas monoicas, las flores masculinas y femeninas en el mismo árbol; las masculinas en conillos solitarios o en grupos, axilares, oblongos, amarillos a púrpura, las anteras numerosas, con dos sacos poliníferos. Conos femeninos en su mayoría sobre las ramas superiores, colgantes, cilíndricos a elípticos u ovoides, sésiles o terminales en las ramillas (en ese caso dan la impresión de ser pedunculados); los conos están formados por numerosas escamas delgadas y persistentes, colocadas en espiral alrededor del eje, cada una con una bráctea incluida (es decir, que no sobresale del ápice de la escama). Las semillas son dos en cada escama, aladas. Cotiledones 5-10(-15). x =12 (adaptado de Earle, 2020).

1.2 Clave para identificación de las especies mexicanas de *Picea*

1. Hojas algo planas o de sección cuadrangular-aplanada, tiesas o algo flexibles, con punta aguda pero no como espina; conos de 3.6 a 8 cm de largo, la parte expuesta de las escamas tiene forma rómbica o deltoide. Se conoce para Coahuila y Chihuahua, de entre 2,850 y 3,600 m de elevación. . . . . *P. mexicana*

1. Hojas de sección cuadrangular a poco planas, tiesas, con punta como espina (se clavan fácilmente en la piel); conos de 8 a 18 cm de largo, la parte expuesta de las escamas tiene forma de abanico o de escama de pescado. De Nuevo León, Chihuahua y Durango, a menos de 3,000 m de elevación.

2. Hojas de color verde pálido a verde azuloso, estomas de color verdoso, más o menos visibles; conos de 8 a 15 cm de largo. De Chihuahua y Durango, entre 2,150 y 3,000 m de elevación, asociada a elementos de bosque de coníferas. . . . . *P. chihuahuana*

2. Hojas de color verde a verde intenso, estomas de color grisáceo, poco visibles; conos de 8 a 18 cm de largo. De Nuevo León, entre 1,800 y 2,650 m de elevación, asociada a elementos de bosque mesófilo . . . . . *P. martinezii*

1.3 Nomenclatura, descripción botánica y taxonomía

1.3.1 *Picea chihuahuana* Martínez

Picea chihuahuana Martínez. Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional de México 13: 31. 1942.

Sinónimo: No tiene sinónimos.

Tipo: México: Chihuahua: Bocoyna, Tucheachic; Abr 1942, *M. Martínez 3401* (HT: MEXU; IT: A, F, US, WIS).

Nombres comunes: picea, pinabete, pinabete espinoso, cahuite, cahuite espinoso, cahuite bravo (Ledig *et al.,* 2000); pino espinoso (Cortés Montaño, 2013); mategó, pinabete de Chihuahua (Melgoza-Castillo *et al*., 2016); guayame, guayamé; Chihuahua spruce.

Árbol hasta de 41 m de altura (un registro de hasta 51 m), con fuste hasta de 92 cm de DAP. (un registro de 1.5 m en Ledig *et al.,* 2000b), de madera dura. Copa cónica, cónica-columnar o aguzada, el follaje de color verde grisáceo o azuloso. Corteza agrietada, la superficie en placas irregulares a algo cuadriculada, de color grisáceo o café cenizo. Ramas inferiores horizontales a descendentes; ramillas glabras. Hojas linear-aciculares, de 1.3 a 3 cm de largo por 1 a 1.7 mm de ancho, de sección cuadrangular, rectas o algo curvadas, rígidas, con la punta aguda y muy punzante, de color verde pálido o verde azuloso; son fácilmente desprendibles de la ramilla, por lo que en el material seco se ven las ramillas ya sin hojas, muy rugosas debido a las prominencias que dejan éstas; estomas en hileras de 3 a 6 en cada cara; canales resiníferos 2, marginales, en los ángulos o casi en los ángulos del eje menor de la hoja, poco evidentes; haz vascular solitario. Las hojas son polísticas (acomodadas hacia todos lados de la ramilla), en las ramillas superiores son rectas o algo curvadas y dirigidas hacia la punta. Conos masculinos de alrededor de 3 cm de largo. Conos femeninos colgantes en los extremos de las ramas superiores, cilíndricos o cilíndrico-oblongos, rectos o algo curvados, muy poco atenuados en el ápice, solitarios, en pares o a veces en grupos de 3 o 4, sobre pedúnculos

fuertes y curvados de unos 10 mm; maduros miden de 8 a 15 cm de largo y 3.5 a 4.5 cm de diámetro, de color castaño brillante o café rojizo, más obscuro en la superficie inferior de las escamas; escamas numerosas, imbricadas, delgadas, coriáceo-leñosas, persistentes, de forma anchamente obovada (como escama de pescado, con ápice amplio y redondeado a truncado), algo cuneadas hacia la base, las de la parte media y basal del cono son más aplanadas, de 12 a 22 mm de largo por 13 a 19 mm de ancho, el borde entero, algo reflejas, con una bráctea dorsal de 4 a 5 mm de longitud, de borde y ápice laciniado, que no sobrepasa el borde de la escama. Semilla de 3 a 5 mm de largo, elíptica, atenuada en la base, obscura, con ala casi oval, de color amarillento o algo rosado, con ganchos diminutos (adaptado de García Arévalo y González Elizondo, 2003) (Lámina 1).

Picea chihuahuana se describió de Bocoyna, Chihuahua (Martínez, 1942). Es el representante más sureño del género *Picea*, seguido por *P. morrisonicola* Hayata, de Taiwán y representa un relicto de la distribución más amplia que anteriormente tuvo el género.

No se ha encontrado una posición filogenética clara para *P. chihuahuana*, la cual está muy relacionada con *P. martinezii* (Eckenwalder, 2009), pero no tanto con las otras especies de Norteamérica; se relaciona más bien con especies asiáticas, como había sugerido Gordon desde 1968 y Rushforth en 1984, lo cual se confirma en los estudios genéticos de Ran *et al.,* (2006). Shao *et al.,* (2019) la reportan como especie hermana de *P. engelmannii* Engelm.[1], pero con muy baja resolución. Los estudios de Ran *et al.,* y Shao *et al*., no incluyeron a *P. martinezii* ni a *P. mexicana*. *Picea chihuahuana* es una especie muy distintiva, que parece haberse derivado independientemente de sus antecesores asiáticos (Taylor *et al.,* 1994), al igual que *P. martinezii*. Por esa razón, estas especies son de gran interés desde el punto de vista evolutivo y ecológico.

1.3.2 *Picea martinezii* T.F. Patt.

***Picea martinezii* T.F. Patt.**, Sida 13(2): 131–135, f. 1–2. 1988.

Sinónimo: *Picea chihuahuana* Martínez var. *martinezii* (T.F. Patt.) Eckenw.

Tipo: México: Nuevo León: Montemorelos, 6 km SE of La Trinidad on a NE exposed talus slope below the precipice "El Butano", 25°11'N, -100°07'W; mixed conifer-deciduous forest; 2200 m alt, 8 Jul 1987, *T.F. Patterson 5629* (HT: TEX; IT: ENCB, INIF, MEXU, MO, US).

Nombres comunes: picea, pinabete, pinabete de Nuevo León; Martinez spruce.

Árbol hasta de 40 m de altura, con fuste de 0.4 a más de 1 m de DAP. Copa cónica a cónico-columnar, el follaje verde brillante o verde oscuro, perennifolio. Corteza del-

[1] El autor de *Picea engelmannii* es George Engelmann, quien aceptó el epíteto específico que Charles Parry había aplicado (como *"Abies engelmannii"*). Parry hizo notar que Engelmann había descubierto la especie y solamente enlistó el nombre, de manera que la cita correcta del autor es "Engelm." y no "Parry ex Engelm." como a veces se registra.

Lámina 1. *Picea chihuahuana* en Santa Bárbara, Dgo. A, B. Hábito; C. Corteza; D. Ramillas y hojas; E. Árbol joven; F. Conos. Fotografías: S. González Elizondo.

gada y escamosa que se descascara en pequeñas láminas circulares café pálidas a café grisáceas. Ramas ampliamente espaciadas, las inferiores algo colgantes y las superiores ascendentes; ramillas glabras. Hojas linear-aciculares, de 1.1 a 3.5 cm de largo y 1 a 2 mm de ancho, de sección cuadrangular algo aplanada, rectas o algo curvadas, rígidas, con la punta aguda y muy punzante, de color verde; son fácilmente desprendibles de la ramilla; estomas en hileras, grisáceos y poco evidentes; canales resiníferos no evidentes; cada hoja sobre un cojinete de 1.5 mm. Las hojas son polísticas (acomodadas hacia todos lados de la ramilla), en las ramillas superiores son rectas o algo curvadas y dirigidas hacia la punta. Conos masculinos subterminales en grupos de tres, ovales, de alrededor de 1.5 cm de largo y 1 cm de ancho; la prolongación escamiforme del conectivo rómbico orbicular, de 2.5 mm de largo y 2 mm de ancho, con el borde superior eroso; anteras de 2.5 mm, que se abren por hendeduras longitudinales; polen oval con 2 grandes vejigas áereas. Conos femeninos de 8 a 18 cm de largo, ca 3 cm de ancho cuando están cerrados y hasta 6 cm ya abiertos, cilíndricos a estrechamente elipsoides, de color marrón a marrón-rojizo, terminales o laterales, colgantes; escamas numerosas, imbricadas, delgadas, coriáceo-leñosas, persistentes, de forma anchamente obovada (como escama de pescado, con ápice amplio y redondeado a truncado), con la parte expuesta (apomeris) lisa, el borde superior y el ápice finamente eroso-denticulado, de 14 mm de largo y 20 a 25 de ancho, con una bráctea dorsal elíptica, acuminada, de 5.5 a 6 mm de largo; ala de 7 mm de largo por 5 de ancho, no sobrepasa el borde de la escama. Semilla de 4 a 8 mm de largo, ovoide, con ala de 12 a 16 mm de largo (Lámina 2).

Picea martinezii fue descrita por Thomas F. Patterson (1988), quien la nombró en honor del Prof. Maximino Martínez, estudioso de las coníferas mexicanas que trabajó muy a la par con el sector forestal. *Picea martinezii* fue originalmente reportada con el nombre de *P. chihuahuana* (Müller-Using y Velázquez, 1983; Müller-Using y Alanís, 1984) y ha sido considerada como sinónimo de esta (por ejemplo, por Farjon, 1990, 2001; CONABIO, 2009), o como una variedad: *P. chihuahuana* var. *martinezii* (Eckenwalder, 2009). Es por esta razón que en CONABIO (2009) se citan únicamente dos especies para México: *Picea chihuahuana* y *P. engelmannii*.

Sin embargo, diversos estudios bioquímicos y genéticos han demostrado el estatus taxonómico de *P. martinezii* como especie independiente (Tayl or *et al.,* 1994; Ledig *et al.,* 2004; Jaramillo-Correa *et al.,* 2006; Debreczy y Rácz, 2011) e incluso muestran su clara divergencia de otras especies (Lockwood *et al.,* 2013). Jaramillo-Correa *et al.,* (2006) analizaron secuencias de mtDNA de *P. martinezii* a partir de muestras de las poblaciones de La Tinaja y Cañón El Butano, N.L.

Aunque es especie hermana de *P. chihuahuana*, difiere de esta desde el punto de vista morfológico en tener las hojas más largas y verde brillantes y conos más grandes. Ambas especies parecen no estar muy relacionadas con especies de Norteamérica, sino más bien con otras del este de Asia. La evidencia fósil indica P. *martinezii*, al igual que *P. chihuahuana*, tuvieron una distribución más amplia en el pasado, hasta el centro de México.

Lámina 2. *Picea martinezii* en Zaragoza, N.L. A. Hábito; B. Corteza; C. Cono; D. Ramilla y hojas; E. Ramificación superior. Fotografías: C. Wehenkel

1.3.3 *Picea mexicana* Martínez

Picea mexicana Martínez, Anales Inst. Biol. Univ. Nac. México 32: 137. 1961.

Sinónimos: *Picea engelmannii* var. *mexicana* (Martínez) R.J. Taylor & T.F. Patt. Taxon 29(4): 438. 1980, nombre inválido (no citan basónimo). *Picea engelmannii* var. *mexicana* (Martínez) Silba, Phytologia 7: 44. 1984. *Picea engelmannii* subsp. *mexicana* (Martínez) P.A. Schmidt, Haussknechtia 4: 38. 1988.

Tipo: El Carmen, municipio de Rayones, Nuevo León (entre San Antonio de Las Alazanas, Coah. y la Sierra de Santa Marta), 75 km al sureste de Saltillo, Coah. 2700 m. Ladera de exposición norte, en terrenos calizos y húmedos. 26 Jul 1961. *Vázquez Soto 500a* (HT: MEXU; IT: ENCB, INIFAP (ahora en MEXU), US).

Nombres comunes: abeto (Encina Domínguez y Villarreal Quintanilla, 2018), ciprés (Martínez, 1963), haya (Jacob, 1994); picea, pícea mexicana; pinabete; pinabete mexicano (Villarreal Quintanilla y Encina Domínguez, 2018); Mexican spruce.

Árbol hasta de 30 m de altura, con fuste hasta de 0.8 m de DAP. Corteza poco rugosa, de 15 a 18 mm de grueso, con placas grisáceo blanquecinas, la corteza interior expuesta de color amarillento a marrón grisáceo. Ramas verticiladas, ascendentes o las inferiores extendidas, formando una copa cónica a cónico-columnar. Follaje verde grisáceo a glauco (verde azuloso); ramillas de color amarillo opaco, finamente pubescentes. Hojas lineares, menos rígidas que las de *P. chihuahuana* y *P. martinezii*, de 1.5 a 3.6 cm de largo y 1 a 2 mm de ancho, de sección cuadrangular-aplanada a casi planas, la punta córnea, pero no punzante, con tres o cuatro hileras de estomas en cada cara, sin canales resiníferos evidentes; cada hoja sobre un cojinete de 1.5 a 3 mm; polísticas (acomodadas hacia todos lados de la ramilla), en las ramillas superiores son rectas o algo curvadas y dirigidas hacia el ápice de la ramilla. Conos masculinos subterminales en grupos de tres, ovales, de 15 mm de largo por 10 de ancho; la prolongación escamiforme del conectivo rómbico orbicular, de 2.5 mm de largo y 2 mm de ancho, con el borde superior eroso; anteras de 2.5 mm que se abren por hendeduras longitudinales; polen oval con 2 grandes vejigas áereas. Conos femeninos de 3.6 a 8 cm de largo, cilíndricos a oblongo-cilíndricos, de color amarillento a marrón-amarillento o morado, terminales o laterales, colgantes; escamas con la parte expuesta (apomeris) subrómbica a deltoide, estriada, con el ápice redondeado, el borde superior y el ápice finamente eroso denticulados, de 14 mm de largo y 10 a 12 mm de ancho, bráctea dorsal elíptica, acuminada, de 5.5 a 6 mm; ala de 7 mm de largo por 5 mm de ancho. Semillas de 3.5 a 5 mm de largo y 2 a 3 mm de ancho, ovoides, pardas (Lámina 3).

Procede hacer una aclaración importante respecto a la localidad tipo de *Picea mexicana*: aunque la especie se describió originalmente como de Rayones, Nuevo León, el registro del municipio y del estado son erróneos ya que la localidad de El Carmen forma parte del municipio de Arteaga, Coahuila. En diversos documentos se sigue registrando a la población de *Picea mexicana* de La Marta para Nuevo León y, curiosamente, algunos procesos administrativos de predios de la zona se llevan todavía a cabo en ese estado. Sin embargo, desde fines de 1892, forman parte de Coahuila, cuando ambos estados permutaron algunos terrenos y Nuevo León le pasó a Coahuila una franja de

Lámina 3. *Picea mexicana* en Arteaga, Coah. A, B. Hábito; C. Ramilla y hojas; D. Conos inmaduros; E. Corteza y ramas inferiores; F. Hábitat. Fotografías A, B, C, E, F: E. Mendoza Maya; Fotografía D: C. Wehenkel

la sierra con el fin de obtener lo que actualmente es la zona de Colombia para ganar acceso directo con los Estados Unidos (Ceballos Ramírez, 2017).

Picea mexicana fue descrita por Martínez (1961), pero posteriormente fue considerada a nivel de variedad o de subespecie de *Picea engelmannii* por varios autores (Taylor y Patterson, 1980; Taylor *et al.,* 1994; Ledig *et al.,* 2004; Farjon, 2001, 2010; Debreczy y Rácz, 2011; Earle y Frankis, 2018; SIRE s.f.). Rehfeldt (1994) sugirió que podría ser sinónimo de *P. engelmannii*, pero se requerían más estudios para definir su estatus taxonómico; sin embargo, posteriormente (en 2004), el mismo Rehfeldt la reconoció a nivel de especie (*P. mexicana*), un criterio se ha seguido por Eckenwalder (2009), Gernandt y Pérez-de la Rosa (2014) y otros, incluyendo la presente revisión.

Diversas evidencias han mostrado que, a pesar de su similitud morfológica, *P. mexicana* es una especie diferente de *P. engelmannii* (Bouillé *et al.,* 2011; Ledig *et al.,* 2002, 2004; Lockwood *et al.,* 2013). Aunque ambas especies comparten caracteres morfológicos como son las ramillas pubescentes, la relación más estrecha de *P. mexicana* parece ser con *P. pungens* Engelm. (Lockwood *et al.,* 2013), la cual tiene las ramillas usualmente glabras y se conoce del centro-oeste de Estados Unidos (Taylor, 2002). Por otra parte, la relación más cercana de *P. engelmannii* es *Picea glauca* (Moench) Voss, de acuerdo a las secuencias de DNA mitocondrial, nuclear y de plástidos analizadas por Lockwood *et al.,* (2013). *Picea engelmannii* se distribuye en el oeste de Norteamérica (desde el suroeste de Canadá hasta el norte de California y, a través de las Montañas Rocallosas, llega hasta el sur de Arizona y Nuevo México), mientras que su especie hermana, *P. glauca*, se conoce de más al norte, desde Alaska y buena parte de Canadá hasta el norte de Estados Unidos.

Entre las principales diferencias morfológicas con *P. engelmannii* están el color más pálido de la corteza, acículas más largas, más agudas, menos aromáticas y con menos líneas de estomas, brácteas del cono más cortas, y semillas de color marrón oscuro a casi negras (vs marrón gris) (Debreczy y Rácz, 2011). De *Picea pungens* se distingue claramente ya que esa especie tiene las ramillas lisas (vs pubescentes como en *P. engelmannii* y *P. mexicana*), las hojas con dos canales resiníferos (vs. sin canales), más tiesas y pungentes, y las escamas del cono ovales y angostadas hacia el ápice (vs subrómbicas) (Martínez, 1963).

Originalmente, Taylor y Patterson (1980) consideraron a la población del Cerro Mohinora como de posible origen híbrido y la trataron con el nombre informal de *Picea* "hybrida" debido a la gran variación entre sus individuos y a que comparte diversos caracteres con *P. engelmannii*. Debido a las semejanzas en sus perfiles fenólicos y en los caracteres morfológicos compartidos entre *P. engelmannii* y *P. mexicana*, estos autores consideraron que *P. mexicana* no ameritaba ser reconocida a nivel de especie y la redujeron a variedad de *P. engelmannii*. Sin embargo, esa combinación fue inválida desde el punto de vista nomenclatural (ya que no citaron de manera formal el basónimo al hacer la combinación). En ese mismo trabajo, Taylor y Patterson sugerían que la población de *P. engelmannii* de las montañas Chiricahuas, al sur de Arizona, debería ser considerada también como parte de la variedad *mexicana*.

Farjon (1990) la trató a nivel de subespecie, indicando que difiere de la típica

(*engelmannii*) en su corteza más clara (gris), hojas más estrechas (1-1.2 mm) y bráctea de la escama más estrecha y ligeramente más larga (4-6 mm). Earle (2020) hace notar que el dato de medida de las brácteas no es muy confiable ya que también en *P. engelmannii* puede haber brácteas largas, pero que los conos y semillas pueden servir para distinguir ambas especies: conos más grandes en *P. mexicana* (4.5-8 cm, vs 3-6) y semillas también ligeramente mayores, aunque llega a haber traslape (conos en la colección de M.P. Frankis). Bouillé *et al.,* (2011) ya habían encontrado que las similitudes en filogenias de cloroplasto sugieren una evolución reticulada en el grupo, que no sustenta reducir a *P. mexicana* bajo *P. engelmannii*. Ellos sugieren que los tratamientos taxonómicos en *Picea* son aún problemáticos ya que hay entidades morfológica o fenotípicamente similares que no necesariamente son cercanas genéticamente; es decir, la afinidad morfológica no necesariamente refleja relaciones de parentesco. Adicionalmente, Flores-López *et al.,* (2013) registran evidencias en variación morfoanatómica que sugieren divergencia entre las dos poblaciones de la Sierra Madre Oriental, así como entre estas y la población de la Sierra Madre Occidental.

REFERENCIAS

Bouillé, M., S. Senneville and J. Bousquet. 2011. Discordant mtDNA and cpDNA phylogenies indicate geographic speciation and reticulation as driving factors for the diversification of the genus *Picea*. Tree Genetics & Genomes 7: 469-484. DOI: 10.1007/s11295-010-0349-z

Ceballos Ramírez, M. 2017. El control geopolítico en el noreste porfiriano: Nuevo Laredo y la fundación de Colombia en 1892. Frontera Norte 3(5), https://doi.org/10.17428/rfn.v3i5.1614

CONABIO. 2009. Catálogo taxonómico de especies de México. CD1. In Capital Nat. México. CONABIO, Ciudad de México.

Cortés Montaño, C. 2013. Los bosques antiguos del ejido Cinco de Mayo en Chihuahua - Patrimonio natural de México. www.cotorras.org. IGERT Program, Northern Arizona University – ITESM Monterrey – The Nature Conservancy – U.S. Forest Service. 13 p.

Debreczy, Z. e I. Rácz. 2011. *Conifers around the World*. Vol. 2. DendroPress Ltd., Budapest. p. 541-1089.

Dietrich, A.G. 1824. *Picea.* Fl. Berlin 1(2): 794.

Earle, C.J. 2020. The Gymnosperm Database. Disponible en: http://www.conifers.org (Consultada 10 de junio de 2020).

Earle, C.J. and M.P. Frankis. 2018. *Picea engelmannii* subsp. *mexicana* en The gymnosperm database. Disponible en: https://www.conifers.org/pi/Picea_engelmannii_mexicana.php (Consultada 30 de enero de 2019).

Eckenwalder, J. E. 2009. *Conifers of the World: The Complete Reference*, 1a. ed. Timber Press, Portland.

Encina Domínguez, J.A. y J.A. Villarreal Quintanilla. 2018. Gimnospermas: pinos, cedros y otras coníferas, p. 191-198 en: La Biodiversidad de Coahuila, Estudio de Estado, Vol. II. CONABIO-Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, México.

Farjon, A. 1990. Pinaceae: drawings and descriptions of the genera *Abies, Cedrus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix* and *Picea*. Königstein: Koeltz Scientific Books.

Farjon, A. 2001. *World checklist and bibliography of conifers*, 2da ed. Royal Botanical Garden, Richmond, U.K. p. 150-167.

Farjon, A. 2010. *A Handbook of the World's Conifers*. Koninklijke Brill, Leiden. 1111 p.

Flores-López, C., G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2013. Variación morfológica en poblaciones naturales *Picea mexicana* Martínez. Revista Forestal Baracoa 32(2): 3-9.

García-Arévalo, A. y M.S. González Elizondo, 2003. *Pináceas de Durango* (2ª. ed.). CONAFOR e Instituto de Ecología, A.C. México, D.F. 187 p.

Gernandt, D.S. y J.A. Pérez-de la Rosa. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. Revista Mexicana de Biodiversidad 85: S126-S133.

Gordon, A.G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. Ecology 49: 880-896.

Graham, A. 1976. Studies in Neotropical Paleobotany. II. The Miocene Communities of Veracruz, Mexico. Annals of the Missouri Botanical Garden 63(4): 787-842, https://doi.org/10.2307/2395250

Jacob C., V. 1994. Estudio Isoenzimático de la Variación Genética de *Picea chihuahuana* en los Estados de Chihuahua, Durango y Nuevo León. Tesis profesional (Biología), ENEP-Iztacala, UNAM. México, D.F.

Jaramillo-Correa, J.P., J. Beaulieu, F.T. Ledig and J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. Journal of Molecular Ecology 15(10): 2787-2800.

Ledig, F.T., V. Jacob-Cervantes, P.D. Hodgskiss and T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. Evolution 51: 1815-1827.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López and M.A. Capó-Arteaga. 2000. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47(2): 71-88.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3(2): 113-122.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss, K. V. Krutovskii, D. B. Neale and T. Eguiluz-Piedra. 2004. Relationships among the Spruces (*Picea*, Pinaceae) at Southwestern North America. Systematic Botany 29(2): 275-295.

Lockwood, J., M. Aleksić, J. Zou, J. Wang, J. Liu and S.S. Renner. 2013. A new phy-

logeny for the genus *Picea* from plastid, mitochondrial, and nuclear sequences. Molecular Phylogenetics and Evolution 69: 717-727. http://dx.doi.org/10.1016/j.ympev.2013.07.004

Martínez, M. 1942. Una nueva Pinácea mexicana. *Picea chihuahuana* sp. nov. Anal. Inst. Biol. México 13: 31-34.

Martínez, M. 1961. Una nueva especie de *Picea* en México. Anales de Instituto de Biología 32: 137-142.

Martínez, M. 1963. Las Pináceas Mexicanas, tercera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 400 p.

Melgoza-Castillo, A., O. Rivero Hernández, C. Pinedo Álvarez y H.R. Bolaños García. 2016. Especies indicadoras para la Sierra Tarahumara. Proyecto Tarahumara Sustentable. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México. 36 p.

Müller-Using B. y S. Velázquez F. 1983. Aportes a la distribución geográfica del pinabete de Chihuahua (*Picea chihuahuana* Martínez) en México: dos nuevos registros en el estado de Nuevo León. Documento inédito. 21 p.

Müller-Using B. y G. Alanís. 1984. Nuevos registros del pinabete de Chihuahua (*Picea chihuahuana* Martínez) en Nuevo León, propuesta para la protección legal de dos áreas de especial interés ecológico. In: Memorias de la Reunión Regional de Ecología Norte. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (ed.). Monterrey, Nuevo León, México, 25-27 abril 1984. p. 130-132.

Ortega-Rosas, C.I., M.C. Peñalba and J. Guiot. 2008. Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data. Review of Palaeobotany and Palynology 151 (2008) 1-20.

Patterson, T.F. 1988. A new species of *Picea* (Pinaceae) from Nuevo León, México. SIDA, Contributions to Botany 13(2): 131-135, https://www.jstor.org/stable/41966770

Ran, J.H., X.X. Wei and X.Q. Wang. 2006. Molecular phylogeny and biogeography of *Picea* (Pinaceae): implications for phylogeographical studies using cytoplasmic haplotypes. Mol. Phylogenet. Evol. 41: 405-419.

Rehfeldt, G.E. 1994. Adaptation of *Picea engelmannii* populations to the heterogeneous environments of the Intermountain West. Canadian Journal of Botany 72: 1197-1208.

Rushforth, K.D. 1984. Notes on Chinese silver firs. 2. Notes of the Royal Botanic Garden Edinburgh 41(3): 535-540.

Rushforth, K.D. 1986. Mexico's Spruces – rare members of an important genus. The

Kew Magazine 3(3): 119-124.

Rzedowski J. 1983. Vegetación de México. Limusa, Ciudad de México, México. 432 p.

SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. D. O. F. 30 de diciembre de 2010. México. 77 p. En: https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/ 3552/1/nom-059-semarnat-2010__30-dic-2010.pdf (15 de julio de 2020).

Shao, C.C., T.T. Shen, W.T. Jin, H.J. Mao, J.H. Ran and X.Q. Wang. 2019. Phylotranscriptomics resolves interspecific relationships and indicates multiple historical out-of-North America dispersals through the Bering Land Bridge for the genus *Picea* (Pinaceae). Molecular Phylogenetics and Evolution 141: 106610.

SIRE. s.f. *Picea engelmannii* var. *mexicana*. Paquetes tecnológicos. CONAFOR-SIRE-CONABIO. 4 p. disponible en http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/950Picea%20engelmannii.pdf (12 Jul 2020).

Taylor, R.J. 2002. *Picea* en Flora of North America, Vol. 2. Disponible en http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=125375

Taylor, R.J. and T.F. Patterson. 1980. Biosystematics of Mexican spruce species and populations. Taxon 29(4): 421-469. DOI: 10.2307/1220630

Taylor, R.J., T.F. Patterson and R.J. Harrod. 1994. Systematics of Mexican spruce—revisited. Syst. Bot. 19: 47-59.

Van Devender, T.R., R. Thompson and J. Betancourt. 1987. Vegetation history of the deserts of Southwestern North America; the nature and timing of the Late Wisconsin-Holocene transition. P. 323–352 in: Ruddiman, W.F., WrightJr. Jr., H.E. (Eds.), North America and Adjacent Oceans During the Last Deglaciation. The Geology of North America. Geological Society of America, Boulder, Colorado.

Villarreal Quintanilla, J.A. y J.A. Encina Domínguez. 2018. Plantas endémicas y listadas en categorías de protección, p. 199-204 en: La Biodiversidad de Coahuila, Estudio de Estado, Vol. II. CONABIO-Gobierno del Estado de Coahuila de Zaragoza, México.

CAPÍTULO 2

DISTRIBUCIÓN, ECOLOGÍA Y ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LAS PICEAS MEXICANAS

Christian Wehenkel[1*], M. Socorro González Elizondo[2], Eduardo Mendoza Maya[3], J. Ciro Hernández Díaz[1], Carmen Zulema Quiñones Pérez[4]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] CIIDIR, Instituto Politécnico Nacional, Durango, México
[3] Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[4] Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Guadiana, Durango, C.P. 34371, México
*Autor de correspondencia: Christian Wehenkel, wehenkel@ujed.com.mx

Picea es el género de afinidad más boreal entre los grupos arbóreos de México. A nivel mundial, la mayoría de sus especies se localizan al norte del Trópico de Cáncer (23°26'11.4" N), y solamente dos sobrepasan ligeramente al sur de este: *P. chihuahuana* Martínez, a 23°19'52" N en Taxicaringa, Mezquital, Durango, y *P. morrisonicola* Hayata, que también sobrepasa ligeramente al sur en Taiwán (Earle, 2020). *Picea martinezii* T.F. Patt. es notable por distribuirse también en áreas apenas arriba del Trópico de Cáncer y por ocupar, además, elevaciones bajas para la latitud en donde se encuentra.

2.1 *Picea chihuahuana* Martínez

2.1.1 Distribución

Distribución natural

Picea chihuahuana es endémica a la Sierra Madre Occidental en los estados de Chihuahua y Durango. La población más norteña alcanza los 28°39'06" N y la más meriodional los 23°19'52" N, siendo la picea con mayor distribución latitudinal en México (Figura 2.1, Cuadro 2.1). Se desarrolla en un intervalo de elevación de entre 2,150 y 3,000 m. Se conoce de 40 poblaciones, de las cuales 39 fueron registradas por Ledig *et al.,* (2000a) y una (San José de las Causas) registrada posteriormente por Wehenkel y Sáenz-Romero (2012). El número total de individuos es de alrededor de 43,000, incluyendo ár-

boles adultos, jóvenes y renuevos (Ledig *et al.,* 2000a; Jaramillo-Correa *et al.,* 2006; Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012). Sin embargo, más de la mitad de las poblaciones son muy pequeñas, con menos de 500 individuos adultos y, de estas, cinco tienen menos de 50 individuos, entre adultos y jóvenes (Mendoza-Maya *et al.,* 2015).

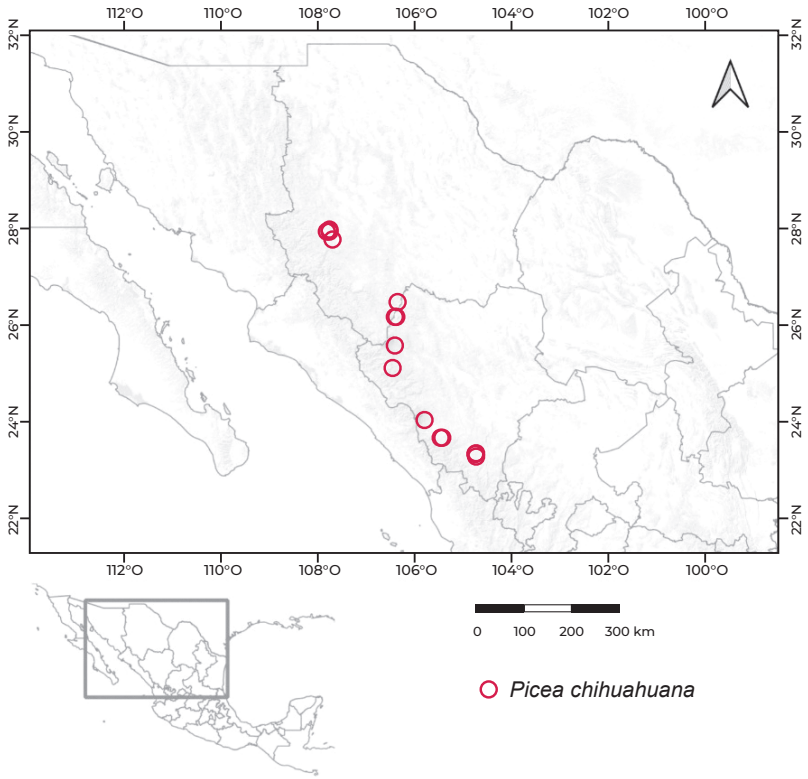


Figura 2.1 Distribución de *Picea chihuahuana*.

Cuadro 2.1 Localidades registradas para *Picea chihuahuana*.

Población	Municipio y Estado	Elevación (m)	Latitud N	Longitud W
Ejido Conoachi	Guerrero, Chih.	2,320	28° 39’ 06”	108° 16’ 21”
Ejido Heredia	Guerrero, Chih.	2,430	28° 11’ 43”	107° 41’ 21”
Ejido San Pablo de la Sierra	Guerrero, Chih.	2,255	28° 06’ 41”	107° 48’ 41”
Ejido San Pablo de la Sierra	Guerrero, Chih.	2,155	28° 06’ 33”	107° 48’ 58”

Población	Municipio y Estado	Elevación (m)	Latitud N	Longitud W
Ejido San Pablo de la Sierra	Guerrero, Chih.	2,225	28° 06’ 18”	107° 48’ 24”
P. Particular La Luisiana y Ejido Ahuichique	Guerrero, Chih.	2,360	28° 06’ 04”	107° 42’ 33”
Ejido Ahuichique	Guerrero, Chih.	2,225	28° 05’ 51”	107° 44’ 15”
Ejido Ahuichique	Guerrero, Chih.	2,235	28° 04’ 40”	107° 45’ 07”
Ejido San Pablo de la Sierra	Guerrero, Chih.	2,235	28° 03’ 58”	107° 46’ 41”
Ejido San Juanito	Bocoyna, Chih.	2,350	27° 57’ 44”	107° 36’ 05”
Ejido El Ranchito	Bocoyna, Chih.	2,380	27° 57’ 24”	107° 46’ 08”
Ejido El Ranchito	Bocoyna, Chih.	2,220	27° 57’ 20”	107° 45’ 12”
Ejido El Ranchito	Bocoyna, Chih.	2,475	27° 57’ 01”	107° 46’ 18”
P. Particular La Laja	Bocoyna, Chih.	2,315	27° 55’ 50”	107° 36’ 43”
P. Particular La Laja	Bocoyna, Chih.	2,385	27° 55’ 35”	107° 37’ 24”
P. Particular La Laja y Ejido Bocoyna	Bocoyna, Chih.	2,425	27° 55’ 30”	107° 37’ 49”
P. Particular La Laja	Bocoyna, Chih.	2,270	27° 55’ 23”	107° 37’ 36”
Ejido Los Volcanes	Bocoyna, Chih.	2,355	27° 55’ 03”	107° 49’ 01”
P. Particular La Laja	Bocoyna, Chih.	2,270	27° 54’ 53”	107° 37’ 10”
P. Particular La Laja	Bocoyna, Chih.	2,340	27° 54” 47”	107° 37” 08”
Ejido El Ranchito	Bocoyna, Chih.	2,392	27° 54’ 27”	107° 45’ 17”
Comunidad San Elías	Bocoyna, Chih.	2,305	27° 45’ 42”	107° 41’ 35”
P. Particular Batuyvo y El Venado y Comunidad San Elías	Bocoyna, Chih.	2,160	27° 44’ 53”	107° 41’ 58”
Ejido El Caldillo y su anexo El Vergel	Balleza, Chih.	2,730	26° 28’ 12”	106° 21’ 51”
Ejido Chiqueros	Guanaceví, Dgo.	2,695	26° 11’ 55”	106° 28’ 13”
Ejido Chiqueros	Guanaceví, Dgo.	2,890	26° 11’ 38”	106° 21’ 54”
Ejido Chiqueros	Guanaceví, Dgo.	2,570	26° 09’ 15”	106° 24’ 17”
Ejido Chiqueros	Guanaceví, Dgo.	2,600	26° 08’ 48”	106° 22’ 53”

Población	Municipio y Estado	Elevación (m)	Latitud N	Longitud W
Ejido Llano Grande	Guanaceví, Dgo.	2,725	26° 03’ 40”	106° 14’ 32”
Ejido Llano Grande	Guanaceví, Dgo.	2,400	26° 03’ 14”	106° 13’ 51”
Ejido El Cedro	Guanaceví, Dgo.	2,750	26° 02’ 49”	106° 18’ 11”
Ejido Llano Grande	Guanaceví, Dgo.	2,645	26° 01’ 56”	106° 12’ 00”
Ejido El Padre y Anexos	Guanaceví, Dgo.	2,580	26° 00’ 41”	106° 27’ 13”
Ejido El Palomo	Guanaceví, Dgo.	2,990	26° 00’ 17”	106° 18’ 14”
Propiedad privada Cebollitas	Canelas, Dgo.	2,450	25° 05’ 45”	106° 26’ 35”
San José de las Causas	San Dimas, Dgo.	2,480	24° 01’ 05”	105° 47’ 06”
Propiedad privada Bajíos de Don Víctor	Durango, Dgo.	2,775	23° 31’ 24”	104° 37’ 20”
Ejido El Brillante	Pueblo Nuevo, Dgo.	2,725	23° 29’ 40”	105° 26’ 08”
Comunidad Santa María Magdalena de Taxicaringa	Mezquital, Dgo.	2,600	23° 21’ 05”	104° 43’ 04”
Comunidad Santa María Magdalena de Taxicaringa	Mezquital, Dgo.	2,685	23° 19’ 52”	104° 45’ 00”

Distribución como especie exótica

Picea chihuahuana se conoce solamente en poblaciones naturales. No se registra como exótica naturalizada para ninguna parte del mundo.

2.1.2 Ecología

Hábitat y asociaciones vegetales

Picea chihuahuana se localiza en pequeños manchones en cañadas húmedas, formando parte de bosques de galería o en laderas con exposición norte, ya que prefiere sitios con alta humedad y temperaturas frías (Lámina 4).

La ecología y especies acompañantes de *Picea chihuahuana* han sido estudiadas para la población de la Quebrada Santa Bárbara, Ejido El Brillante, Dgo. por Gordon (1968), García-Arévalo (2008) y Noriega Villa (2021). En este sitio se registra uno de los bosques de coníferas más diversos de Norteamérica, con seis géneros y 12 especies de coníferas: *Cupressus lusitanica* Mill., *Juniperus blancoi* Martínez var. *blancoi*, *J. deppeana* Steud., *J. durangensis* Martínez, *Abies durangensis* Martínez, *Picea chihuahuana*, *Pinus arizonica* Engelm., *P. durangensis* Martínez, *P. leiophylla* Schltdl. & Cham., *P. strobiformis* Engelm., *P. teocote* Schltdl. & Cham. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *glauca*

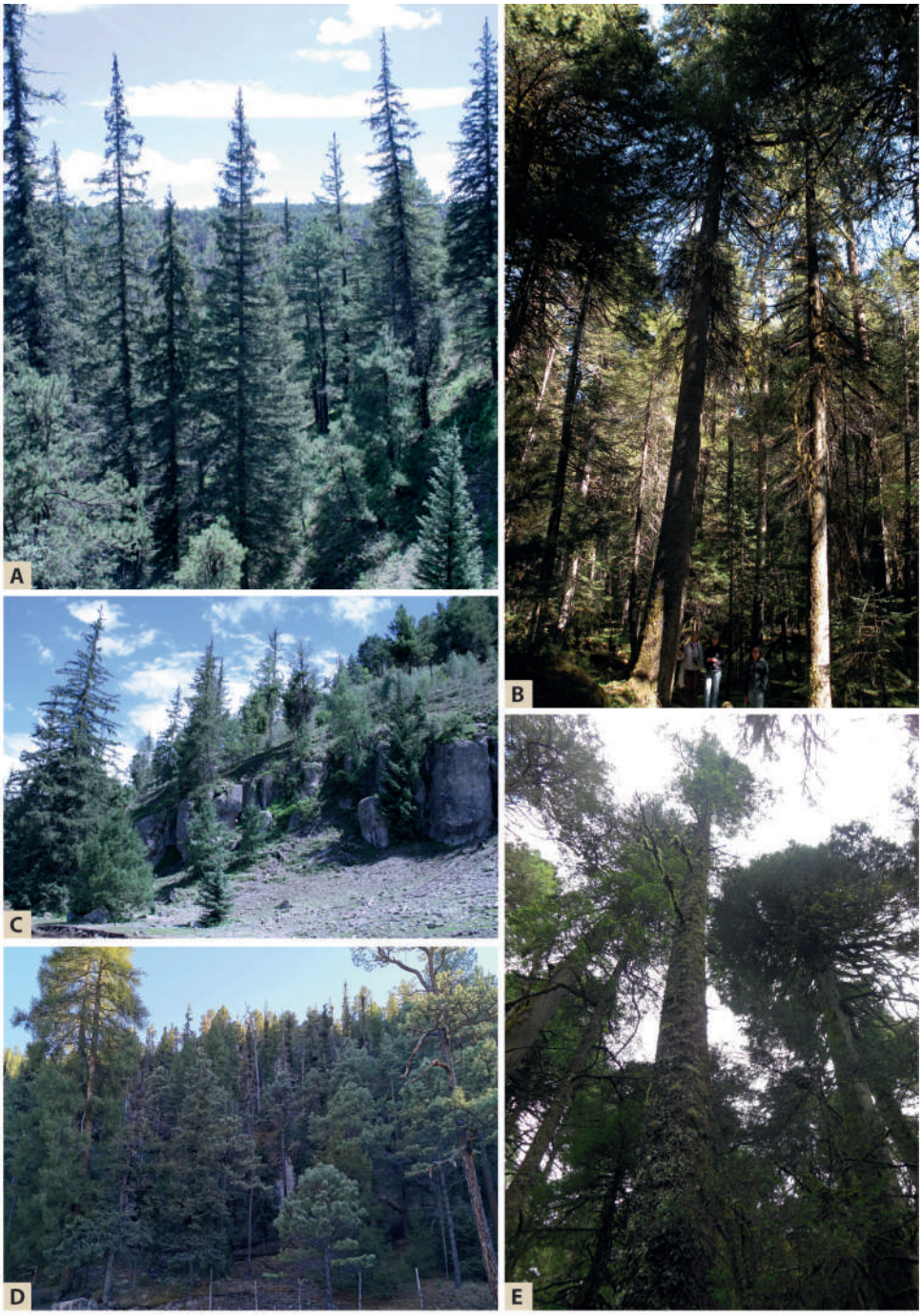


Lámina 4. *Picea chihuahuana*. A, C. Chihuahua; B, E. Santa Bárbara, El Brilante Dgo.; D. Guanaceví, Dgo., con *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus arizonica*. Fotografías: A, C: S. Simental; B, D, E: S. González Elizondo.

(Mayr) Franco. *Pinus cooperi* C.E. Blanco no se incluye en este conteo, pero se encuentra justo en la parte superior de la quebrada. Varios de esos elementos son los que por lo general se asocian a *P. chihuahuana* en otras de sus poblaciones, destacando *Pinus strobiformis, Populus tremuloides* Michx. y los géneros *Pseudotsuga, Abies* y *Cupressus*. Otros árboles acompañantes son los encinos (*Quercus calophylla* Schltdl. & Cham., *Q. rugosa* Née, *Q. sideroxyla* Humb. & Bonpl.), ailes (*Alnus jorullensis* Kunth), madroños (*Arbutus bicolor* S. González, M. González & P.D. Sørensen y otros), *Cornus* sp. y *Sambucus nigra* var. *canadensis* (L.) Bolli.; así como trepadoras como *Hydrangea seemannii* L. Riley y *Lonicera* sp. Entre los arbustos, destacan *Arbutus occidentalis* McVaugh & Rosatti, *Cornus* sp., *Holodiscus* sp. y *Ribes* sp.

Picea chihuahuana forma parte importante del hábitat de muchos organismos, incluyendo especies carismáticas como la cotorra serrana occidental o guacamaya enana (*Rhynchopsitta pachyrhyncha*), para la que estos bosques son el sitio más importante de anidación (Enkerlin-Hoeflich, 1995; Enkerlin-Hoeflich *et al*., 1997, 1998) y albergan también a otras aves características de bosques montanos como es el endémico trogón orejón (*Euptilotis neoxenus*) (Enkerlin-Hoeflich *et al*., 2001; Monterrubio-Rico y Enkerlin-Hoeflich, 2004).

El desarrollo y supervivencia de *P. chihuahuana*, al igual que el del resto de las pináceas, depende de sus relaciones micorrícicas (Estrada-Torres 2004). Los hongos asociados con *P. chihuahuana* en Bocoyna, Chih. han sido estudiados por varios autores: Moreno-Fuentes *et al.,* (1997) registraron 54 especies; Kong-Luz *et al.,* (2000) se enfocaron a los hongos macroscópicos ectomicorrizógenos asociados con *P. chihuahuana*, de los que identificaron 43 especies; Quiñonez-Martínez y Garza Ocañas (2000) identificaron 102 taxa de macromicetos para un área mayor, el Bosque Modelo en Chihuahua (donde también ocurre *P. chihuahuana*) y Quiñonez Martínez *et al.,* (2003) reportaron los hongos ectomicorrizógenos de ese mismo Bosque Modelo. Estrada-Torres (2004) llevaron a cabo un inventario de los hongos ectomicorrizógenos y los myxomycetes asociados con *P. chihuahuana*, haciendo notar que aún hace falta mucho por conocer sobre ese grupo de organismos y sus relaciones con *Picea*.

Geología

Se desarrolla sobre substratos de origen ígneo, principalmente riolitas.

Suelos

Los suelos son ácidos; sobre las laderas predominan los litosoles (= leptosoles, los suelos más someros), mientras que en las zonas de cañada destacan los regosoles. Las poblaciones del norte crecen sobre suelos con menor proporión de arena que las del sur (Dominguez-Guerrero *et al.,* 2017).

Clima

Picea chihuahuana prefiere clima semifrío subhúmedo (Cb'(w^1) x') y templado subhúmedo (C(w^2) x') con lluvias de verano (García, 1998), temperatura media anual de

9 a 12 °C y precipitación entre 600 y 1,300 mm (Dominguez-Guerrero *et al.,* 2017, inferido de Sáenz-Romero *et al.,* 2010). Las poblaciones del norte crecen en condiciones más continentales y de menor humedad que las del sur (Dominguez-Guerrero *et al.,* 2017). Narváez-Flores *et al.,* (1983) y García Ayala (2012) presentan una revisión de las condiciones ambientales donde se desarrolla esta especie.

Aunque en condiciones naturales *P. chihuahuana* crece en climas semifríos y templado-fríos, en experimentos en cámaras de crecimiento con ambiente controlado, esta especie fue capaz de sobrevivir a temperaturas más altas que *Picea mexicana* y *P. martinezii* (Ledig *et al.,* no publicado, citado en Jaramillo-Correa *et al.,* 2006).

Factores físicos y biológicos

Fuego

Fulé *et al*., (2005) registraron la frecuencia de incendios en la Reserva Tutuaca, haciendo notar que la acumulación de materiales combustibles representa un peligro de incendios de magnitud severa y que es necesario aplicar prácticas preventivas. Esta propuesta aplica para todas las poblaciones de *P. chihuahuana*.

Plagas y enfermedades

La palomilla *Cydia phyllisi* Miller (Lepidoptera) ha causado daños severos a los conos de *P. chihuahuana* en varias poblaciones de Chihuahua (Narváez Flores, 1984; García -Ayala, 2012). Fue descrita como parásito específico de *P. chihuahuana,* donde hace galerías en el eje del cono para pupar con lo que reduce la producción de semilla hasta en más de 95% y afecta drásticamente la regeneración de los árboles (Cibrián-Tovar *et al.,* 1986). Hongos de los géneros *Nigrospora* y *Alternaria* causan pudrición de la madera (Melgoza-Castillo *et al.,* 2016). Adicionalmente, ardillas del género *Sciurus* dañan conos, tanto en las poblaciones de Durango como las de Chihuahua (García-Ayala 2012).

La población del sitio La Quebrada, un arroyo afluente del Río Verde, Ejido Chiqueros y Anexos en Guanaceví, Dgo., presenta un alto número de árboles muertos o enfermos, donde se aprecian grandes "escobas de bruja". La patología que las produce está pendiente de identificar, pero probablemente se trate de una roya (acc. Kristen Waring, com. pers., 2021). No se detectaron insectos descortezadores ni *Arceuthobium* en las piceas del sitio (Lámina 5).

Otros factores

Entre los factores adicionales que probablemente contribuyen a la reducción de las poblaciones de *P. chihuahuana* están el pastoreo y la tala clandestina (Ledig *et al.,* 1997, 2000a). El impacto del ganado es a través del ramoneo de las yemas terminales y también por la compactación del suelo, la cual repercute directamente en reducción de la regeneración. Adicionalmente, por lo menos en la década de los 1980's, se extraían árboles jóvenes y otros se despuntaban para uso como árboles de navidad (Narváez Flores *et al.,* 1983).

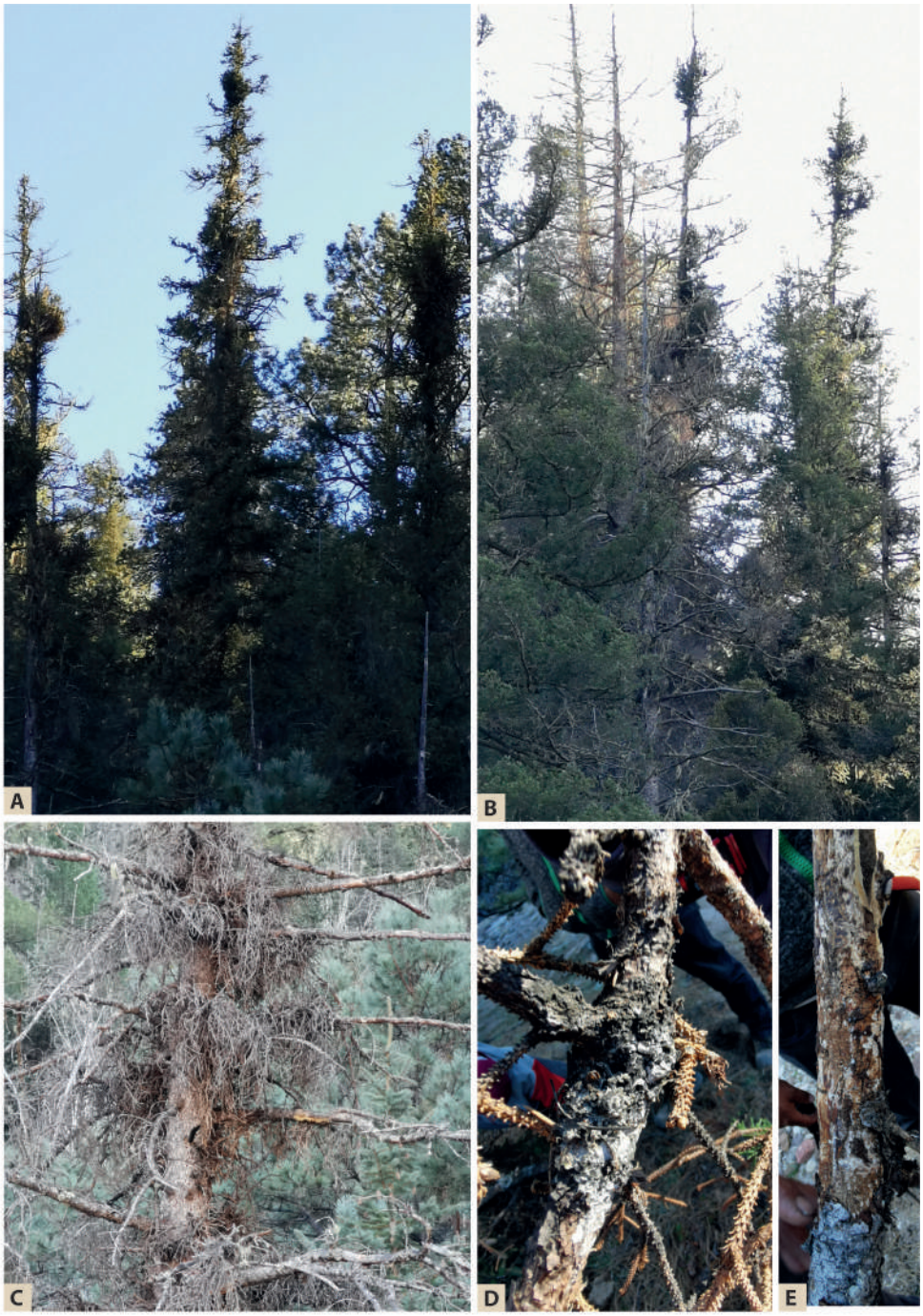


Lámina 5. *Picea chihuahuana* con patología, "escobas de bruja", probable roya. Guanaceví, Dgo . Fotografías: S. González Elizondo.

Características y uso de la madera / Calidad de la madera en rodales naturales

Su madera es dura, blanquecina y algo resinosa (Martínez, 1963). Se presume que sea fuerte y ligera, como se reporta para *Picea* en general (Rushforth, 1986). Debido a su estatus de especie protegida, no se explota de manera legal.

Otros usos

No se registran usos especiales para *Picea chihuahuana*. Sin embargo, por formar parte de la vegetación de partes altas de cuencas y por ocupar zonas riparias y laderas adyacentes, *P. chihuahuana* es una especie de alto valor ambiental, que genera servicios ecológicos de protección de suelo y captación de carbono.

Clave de la especie en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos: 4385.

2.1.3 Estado de conservación

Picea chihuahuana es endémica a la Sierra Madre Occidental. Sus poblaciones son reducidas, restringidas a cañadas húmedas y laderas con exposición norte. Está en la categoría de "En peligro de extinción" (P) bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010 y en el Anexo Normativo III (DOF, 2015). También la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) la considera en la categoría de En Peligro (Endangered, EN) (Thomas and Farjon, 2013a).

El reducido tamaño de sus poblaciones está relacionado principamente con el incremento de las temperaturas. El hábitat potencial de la especie ha ido declinando desde el Último Máximo Glacial (hace ~22,000 años) (Van Devender *et al.,* 1987; Jaramillo-Correa *et al*., 2006; Ortega-Rosas *et al*., 2008; Pinedo-Álvarez *et al.,* 2019). Actualmente ocupa microrrefugios, pero estos se van reduciendo a medida que la temperatura se incrementa, de manera que la especie se ve afectada por endogamia. Diversas propuestas de acción para la conservación de esta especie se presentan en los trabajos de Sánchez Córdoba (1984), Narváez Flores y Sánchez Córdoba (1985), Narváez Flores *et al.,* (1983, 2004), Sánchez Córdova y Narváez Flores (1990), Ledig *et al.,* (2010), Mendoza-Maya *et al.,* (2015), Galván Moreno *et al.,* (2016), Pinedo-Álvarez *et al.,* (2019) y Sáenz-Romero *et al.,* (2020).

2.2 *Picea martinezii* T.F. Patt.

2.2.1 Distribución

Distribución natural

Picea martinezii restringe su distribución a unas pocas poblaciones en la Sierra Madre Oriental, todas en el estado de Nuevo León, al noreste de México. Crece entre los 1,800 y 2,650 m, en sitios con humedad todo el año (Figura 2.2). Al igual que en el caso de *P. chihuahuana*, sus poblaciones se restringen a cañadas húmedas, asociada a hábitats riparios. En el Cuadro 2.2 se presenta una relación de las poblaciones silvestres registra-

das de *P. martinezii*. Las localidades más conocidas son las del Cañón El Butano (Ejido La Trinidad, Municipio Montemorelos), Cañada del Puerto (propiedad privada), Agua de Alardín[2] y Agua Fría (ambas son propiedad privada, en el municipio Aramberri), y La Tinaja (Ejido la Encantada, municipio de Zaragoza). Las primeras localidades se encuentran dentro del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (CONABIO-CONANP, 2009).

Distribución como especie exótica

No existen registros de que *P. martinezii* se comporte como exótica naturalizada en ninguna parte del mundo.

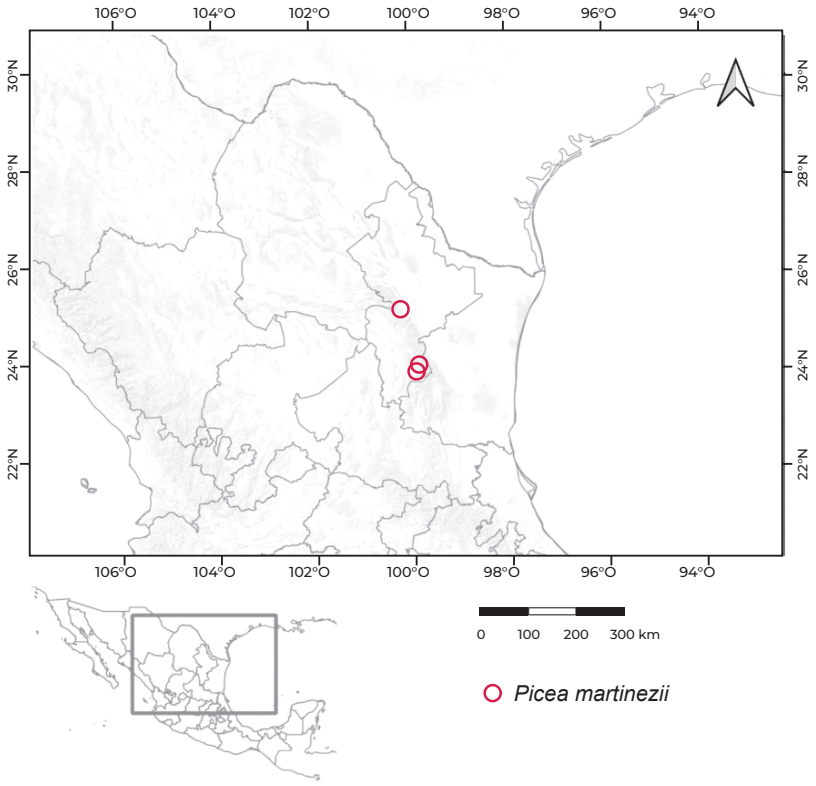


Figura 2.2 Distribución de *Picea martinezii*.

[2]Esta localidad ha sido registrada en algunos trabajos como Agua Lardín.

Cuadro 2.2 Localidades registradas para *Picea martinezii.*

Población	Código	Municipio y Estado	Elevación (m)	Latitud N	Longitud W
El Butano	EB	Montemorelos, NL	2,180	25° 10' 40"	100° 07' 33"
Agua de Alardín	AA	Aramberri, NL	2,120	24° 02' 31"	99° 44' 02"
Agua Fría	AF	Aramberri, NL	1,820	24° 02' 16"	99° 42' 36"
La Encantada	LE	Zaragoza, NL	2,515	23° 53' 24"	99° 47' 27"
La Encantada 2	LE-2	Zaragoza, NL	2,378	23° 53' 24"	99° 46' 40"
La Encantada 3	LE-3	Zaragoza, NL	2,483	23° 53' 24"	99° 46' 22"

El sitio Agua de Alardín fue registrado como Cañada El Puerto por Ledig *et al.,* (2000b).

2.2.2 Ecología

Hábitat y asociaciones vegetales

Picea martinezii se desarrolla en cañadas húmedas y a orilla de arroyos en bosque mesófilo de montaña y en bosque mixto de coníferas y latifoliadas, asociada principalmente con encinos (*Quercus rysophylla* Weath. y *Q. affinis* Scheidw.), palo barranco (*Carpinus caroliniana* Walter *s.l.*), tila (*Tilia mexicana* Schltdl.), cornus (*Cornus urbiniana* Rose), palo verde (*Ilex* sp.), *Fagus mexicana* Martínez y *Taxus globosa* Schltdl. (Lámina 6).

En el Parque Nacional Cumbres de Monterrey convive con pino blanco (*Pinus pseudostrobus* var. *estevezii*), hayarín (*Pseudotsuga menziesi*), guayamel blanco u oyamel (*Abies vejari*) y nogal (*Juglans major*). En otros sitios, con oyamel (*Abies* sp.), pino (*Pinus* sp.), romerillo o tejo (*Taxus globosa*), encinos (*Quercus*), *Tilia*, *Ostrya*, *Cornus*, *Ilex*, *Juglans* y *Crataegus* (Patterson, 1988). En el Ejido La Trinidad se asocia con cornus (*Cornus urbiniana*), palo verde (*Ilex rubra*), encino (*Quercus*), abeto u oyamel (*Abies*), nogal cimarrón (*Carya ovata*) y romerillo (*Taxus globosa*) (CONABIO-CONANP, 2009; Villalba Lugo, 2009).

Geología

Crece sobre substratos sedimentarios, principalmente calizas y, en menos proporción, lutitas.

Suelos

Moderadamente ácidos (a fuertemente ácidos, en El Butano), salinidad muy baja, muy alto contenido de materia orgánica y muy bajo contenido de nitrógeno. La textura es franco-limosa en la población de La Tinaja y franca en El Butano, Agua de Alardín y El Bosque, esta última en el Ejido La Encantada (López Martínez 2018).

Lámina 6. *Picea martinezii* en Zaragoza, N.L ... A, B. Con *Tilia mexicana* , *Cornus urbiniana*; C. Juveniles (C. Wehenkel como referencia); D. Individuo maduro. Fotografías A - D: C. Wehenkel.

Clima

Picea martinezii requiere clima templado con lluvias de verano, pero humedad relativamente alta todo el año; entre las tres piceas de México, es la que soporta las temperaturas más altas, temperatura media anual: 12 - 16 ºC, precipitación media anual: 667 - 855 mm.

Factores físicos y biológicos

Fuego

No existen datos de poblaciones de *P. martinezii* afectadas por incendios. Sin embargo, dado el historial de incendios catastróficos en la Sierra Madre Oriental, el fuego debe ser considerado como una de las mayores amenazas para esta especie.

Plagas y enfermedades

Rushforth (1986) reporta que, a pesar del pequeño tamaño de la población de *P. martinezii* [citada en su trabajo como Picea de Chihuahua], hay un áfido que vive en las piceas, una especie de *Adelges* causante de agallas que se forman en la parte inferior de los nuevos brotes y que encierra a varias acículas. Esas agallas quedan como una masa leñosa de forma semicónica sobre los brotes. Los áfidos *Adelges* tienen generaciones separadas en diferentes especies de árboles hospederos y el pulgón en las piceas podría tener su generación alternativa en, ya sea pino, *Abies vejarii* o *Pseudotsuga menziesii*.

Otros factores

El impacto del pisoteo de plántulas o de individuos jóvenes por ganado afecta la regeneración, aunque en general las poblaciones se encuentran protegidas por cercados. También, se ha observado algo de destrucción de conos y consumo de semillas por fauna silvestre.

Características y uso de la madera / Calidad de la madera en rodales naturales

No se cuenta con información sobre las características de su madera, pero se presume que es fuerte y ligera, como las de otras especies de *Picea*. Ha ocurrido extracción de madera en pequeña escala, pero en general los habitantes respetan las poblaciones de esta especie.

Otros usos

No se registran usos especiales para *Picea martinezii*. Sin embargo, por formar parte de la vegetación de zonas riparias y de laderas adyacentes, la especie tiene un alto valor ecológico al proveer servicios ambientales de protección de suelo y de captación de carbono. Valdés Castillo (2018) reporta que el contenido de carbono (C) en *P. martinezii* equivale al 46.98% de la biomasa total del árbol y que las especies que almacenan altos contenidos de C son potencialmente aprovechables en el mercado, lo que es económi-

camente viable y ayuda a capturar gases de efecto invernadero. *Picea martinezii* forma, además, parte de los bosques húmedos de la Sierra Madre Oriental que son hábitat para un gran número de organismos, incluyendo a la cotorra serrana oriental (*Rhynchopsitta terresii*).

Picea martinezii posee también potencial económico como árbol de navidad y de ornato, si fuera reproducida en vivero.

Clave de la especie en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos: 5992.

2.2.3 Estado de conservación

Picea martinezii está clasificada como "En peligro de extinción" (P) en la NOM 059 (SEMARNAT, 2010; Estrada Castillón *et al*., 2014) y en el Anexo Normativo III (DOF,2015). En el Libro Rojo de la IUCN también se considera como especie En Peligro (Endangered, EN), con tendencia decreciente en su población (Thomas y Farjon, 2013b).

Flores-López (2014) indica que el número total de individuos maduros no excede de 800 y que la población principal (El Butano) tiene unos 350 árboles. Thomas y Farjon (2013b) reportan esos datos en el Libro Rojo de la IUCN. Sin embargo, un muestreo reciente (Wehenkel *et al.,* inéd.) revela que la población de Agua de Alardín supera los 84,498 individuos. Excepto por esta localidad, *P. martinezii* es una especie de poblaciones muy reducidas, lo que eventualmente puede llevar a puede llevar a rodales pobres o depauperados (Rushforth, 1986). Esto, aunado a su estrecha tolerancia ecológica (o la extensión limitada de los sitios en donde se desarrolla) parecen indicar que puede estar ocupando ya todos los sitios en donde puede crecer.

Flores-López (2014) sugiere que la conservación *quasi in situ*, el extensionismo y la educación ambiental son clave para la conservación de *Picea martinezii*.

Picea martinezii es una especie independiente de *P. chihuahuana* y por lo tanto requiere acciones independientes de conservación (Ledig *et al.,* 2004; Jaramillo-Correa *et al.,* 2006).

Iniciativas de conservación

La población de El Butano se encuentra dentro del Área Natural Protegida "Parque Nacional Cumbres de Monterrey"; esta área cuenta con un Plan de Manejo desde 2004, revisado en 2007, pero, al igual que muchas otras ANP, enfrenta múltiples intereses que ponen en peligro su conservación (CONABIO-CONANP, 2009). La zona de El Butano está relativamente protegida más bien debido a su poca accesibilidad.

La población de La Encantada ha sido protegida con un cerco, pero en algunos segmentos éste ha caído y el ganado tiene acceso a las áreas de *Picea*. Esto representa un problema grave para la conservacion de *P. martinezii* ya que en La Encantada es donde se ha detectado la mayor depresión endogámica de la especie (Flores-López *et al.,* 2012; Flores López 2014).

En cuanto a la población de La Trinidad, por algún tiempo estuvo protegida por la dificultad de acceso, ya que el camino (El Butano) estaba en desuso al momento de la descripción de la especie; aunque actualmente ya hay acceso al área, dado que el camino está en relativamente buenas condiciones, la población ha sido protegida con un cercado y no entra ganado, de manera que continúa en buenas condiciones de conservación.

Picea martinezii tiene un valor ecológico inestimable, además de que es de gran interés desde el punto de vista científico ya que su presencia, en conjunto con otros hallazgos y registros fósiles, ha servido para confirmar las teorías de evolución geológica y florística del territorio de México (CONABIO-CONANP 2009). Al igual que el resto de las piceas, tiene potencial como árbol ornamental. Martínez (1963) hizo notar el potencial ornamental de las piceas por su porte cónico elegante y por los conos masculinos rojos que resaltan.

2.3 *Picea mexicana* Martínez

2.3.1 Distribución

Distribución natural

Picea mexicana, al igual que sus especies emparentadas *P. engelmannii* y *P. glauca*, es un árbol de altas elevaciones, que en algunas zonas alcanza la línea de vegetación subalpina. Se desarrolla en altitudes entre los 2,850 y 3,600 m, principalmente en laderas orientadas hacia el norte y en cañadas. En la Sierra Madre Oriental actualmente se encuentra entre los 3,118 y los 3,585 m, mientras que en la Sierra Madre Occidental está entre los 2,850 y 3,241 m.[3]

Al igual que las otras dos especies del país, *P. mexicana* tiene una distribución muy restringida; se conoce de solamente tres poblaciones: dos en la Sierra Madre Oriental y una en la Sierra Madre Occidental. En la Sierra Madre Oriental, en la Sierra de La Marta y el Cerro El Coahuilón, en Arteaga, Coahuila, cerca de los límites con Nuevo León, separadas únicamente por 5 km (Cañón del Guano) (Cervantes Angel, 2014). De la Sierra Madre Occidental se conoce solamente del Cerro Mohinora, en Guadalupe y Calvo, Chihuahua (Cuadro 2.3).

Picea mexicana se describió originalmente de "El Carmen, municipio de Rayones, Nuevo León". Sin embargo, El Carmen se ubica en el municipio de Arteaga, Coahuila (ver discusión al respecto en el capítulo 1). La línea divisoria entre ambos estados va sobre el parteaguas de La Marta, de lo que se concluye que *Picea mexicana* no se encuentra en Nuevo León y debe ser considerada como endémica a Coahuila y Chihuahua.

[3]La ficha de CONAFOR para *P. engelmannii* var. *mexicana* (CONAFOR s.f. y Musalem *et al*., 2008) refiere una elevación mínima de 2,000 m, adjudicando el dato a Rzedowski (1983). Sin embargo, se trata de un error de interpretación, ya que Rzedowski registra esa elevación como la general para los bosques de *Pseudotsuga* y *Picea* de México, no para *Picea mexicana*.

La elevación registrada para el material original (2,700 m) difiere por más de 400 m de la elevación más baja para la que actualmente se conoce a *P. mexicana* en la Sierra Madre Oriental (3,118 m), de manera que la diferencia entre la elevación registrada con el material Tipo hace 60 años y el intervalo altitudinal donde se desarrolla actualmente en la misma zona (de 3,118 a 3,585 m) es muy grande. Rushforth (1986) menciona que la mayor parte de la población de El Carmen fue diezmada por un incendio en 1975, quedando solo seis árboles en la parte más alta, y que no se cuenta con registros en sitios intermedios hasta uno ubicado a 3,120 m. Durante esta revisión, originalmente consideramos que esa diferencia de más de 400 m podría ser un error explicable tal vez por el equipo poco preciso usado en aquel tiempo. Esta especie se había ido a buscar *ex profeso* por el Ing. Jesús Vázquez Soto, del INIFAP, después de que el Prof. Martínez encontró que se trataba de una *Picea* no descrita para la ciencia, que le había sido reportada poco antes por el Ing. Manuel Enríquez Quintana (Martínez 1961). Sin embargo, el Biol. José G. Sánchez de la Peña, propietario de uno de los predios de la parte alta de Sierra La Marta, Coah., confirma (com. pers.), que antes del gran incendio de 1975 si hubo *P. mexicana* en la zona de El Carmen y que la localidad tipo le fue confirmada por el mismo Ing. Vázquez Soto.

Con el fin de registrar el intervalo altitudinal de la especie en cada localidad, se han muestreado varios sitios, bajo la coordinación de Christian Wehenkel y Eduardo Mendoza Maya (Figura 2.3). El muestreo revela que no hay árboles hacia el lado de Nuevo León (la vertiente sur de La Marta), aunque los hay muy cerca de la cima, a 50 m del límite con el estado de Nuevo León (ej. a 25°11'50"N, 100°21'59"W), siempre en la vertiente hacia el norte de la Sierra de La Marta.

Cuadro 2.3 Localidades registradas en las tres poblaciones de *Picea mexicana*.

Población	Código	Municipio y Estado	Elevación (m)	Latitud N	Longitud W
El Mohinora	EM	Guadalupe y Calvo, Chih.	2,851	25° 58’ 06”	107° 01’ 34”
El Mohinora	EM	Guadalupe y Calvo, Chih.	3,113	25° 57’ 40”	107° 02’ 31”
El Mohinora 2	EM-2	Guadalupe y Calvo, Chih.	3,139	25° 57’ 25”	107° 01’ 44”
El Coahuilón	EC	Arteaga, Coah.	3,528	25° 14’ 49”	100° 21’ 24”
El Coahuilón	EC	Arteaga, Coah.	3,518	25° 14’ 43”	100° 20’ 49”
La Marta	LM	Arteaga, Coah.	3,585	25° 11’ 54”	100° 22’ 01”
La Marta	LM	Arteaga, Coah.	3,494	25° 11’ 53”	100° 21’ 50”
La Marta 2	LM-2	Arteaga, Coah.	3,393	25° 12’ 47”	100° 24’ 47”
La Marta 3	LM-3	Arteaga, Coah.	3,118	25° 12’ 25”	100° 22’ 08”
La Marta 4	LM-4	Arteaga, Coah.	3,475	25° 12’ 18”	100° 23’ 10”
La Marta 5	LM-5	Arteaga, Coah.	3,364	25° 12’ 11”	100° 22’ 8”

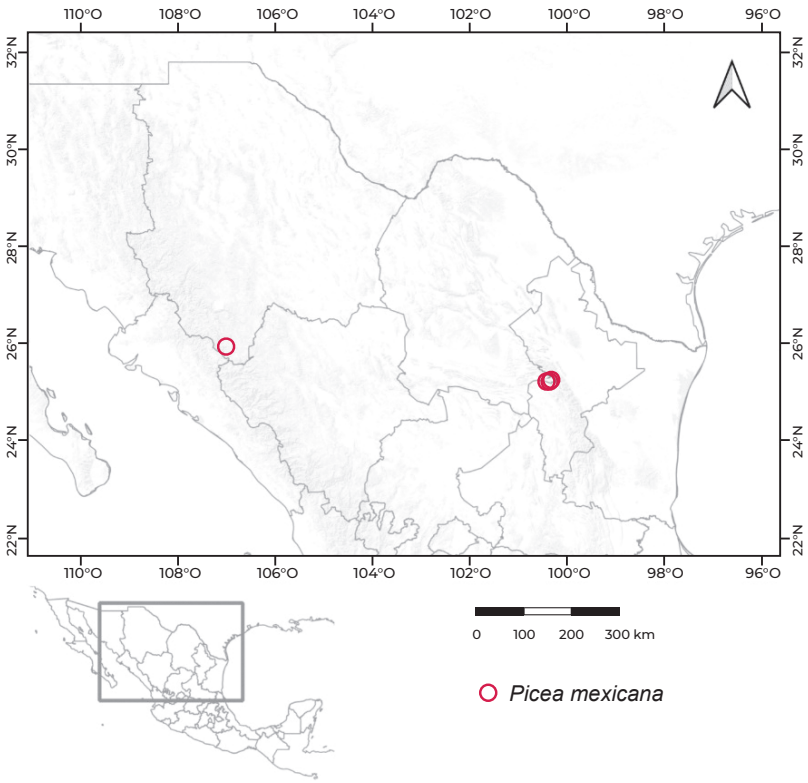


Figura 2.3 Distribución conocida de *Picea mexicana*.

Distribución como especie exótica

No existen registros de que *P. mexicana* se comporte como exótica naturalizada en ninguna parte del mundo.

2.3.2 Ecología

Hábitat y asociaciones vegetales

Picea mexicana se desarrolla en bosques de coníferas. En la Sierra Madre Oriental se asocia con *Abies vejarii, Pinus stylesii*, *Populus tremuloides, Pseudotsuga menziesii* y *Salix paradoxa*, mientras que en la Sierra Madre Occidental se asocia con diversas especies de pino como *Pinus arizonica, P. rudis* y *P. strobiformis*, así como con *Abies durangensis, Populus tremuloides* y *Pseudotsuga menziesii* (Lámina 7).

Fernández Guzmán (2014) estudió los hongos ectomicorrícicos asociados a *Picea mexicana* en la Sierra el Coahuilón, encontrando a *Lycoperdon perlatum* como ectomicorrícico y a *Trichoderma harzianum* asociado al micelio de *Lycoperdon*. Recomienda que en el sustrato donde se trasplanten plántulas de *P. mexicana* se añada suelo de su hábitat nativo como complemento.

Geología

Esta es la única de las tres piceas mexicanas que se desarrolla tanto sobre substratos sedimentarios (roca caliza) en la Sierra Madre Oriental como sobre roca ígnea (riolitas) en la Sierra Madre Occidental.

Suelos

Principalmente sobre litosoles, los suelos muy someros característicos de los sitios con fuertes pendientes. En la Sierra Madre Oriental, sobre litosol cálcico y, en menor escala, sobre regosol calcárico y rendzina; en la Sierra Madre Occidental, sobre litosol y feozem háplico; en todos los casos los suelos son de textura media (Cervantes Angel, 2014).

Clima

Picea mexicana se encuentra en zonas de clima semifrío subhúmedo (Cb'(w^1) x') y templado subhúmedo (C(w^2) x') con lluvias de verano (García, 1998; Cervantes Angel, 2014). En la Sierra Madre Oriental alcanza a llegar al límite con la zona subalpina (Lámina 7). Las piceas mexicanas son un ejemplo viviente de la migración hacia el sur de las floras boreales, durante las glaciaciones. De las tres especies en el país, *P. mexicana* es la que requiere temperaturas más frías para su desarrollo y la menos tolerante al calor.

Factores físicos y biológicos

Fuego

En 1975, un incendio que duró casi seis días arrasó casi por completo a la población de *P. mexicana* en El Carmen, Coahuila, cercana a la población de La Marta, dejando únicamente seis árboles maduros en la parte más alta de la población. Eso puede haber afectado severamente a la base genética de esa población y afectar su capacidad para recolonizar el bosque (Rushforth, 1986).

Los incendios son una amenaza también para la población del Cerro Mohinora en Chihuahua.

Plagas y enfermedades

En un árbol joven de *Picea mexicana* cultivado en un rancho cerca de El Carmen se encontró un áfido *Adelges*, similar al encontrado en *Picea martinezii* por Rushforth (1986). Estos áfidos sobreviven en las piceas, causando agallas leñosas de forma semicónica en la parte inferior de los nuevos brotes y que encierran a varias acículas. Los áfidos *Adelges* tienen generaciones separadas en diferentes especies de árboles hospederos y el pulgón en las piceas podría tener su generación alternativa en pino, o en *Abies vejarii* o en *Pseudotsuga menziesii* (Rushforth, 1986).

En semillas de *P. mexicana* procedentes de La Marta y almacenadas desde 1995, Cervantes Martínez (2000) detectó contaminación con el hongo *Penicillium fuscum* y con las bacterias *Agrobacterium tumefaciens* y *Erwinia* sp. En todos los casos, la germinación fue afectada negativamente, llegando a ser nula para las afectadas por *Penicillium*.

Otros factores

Se calcula que las poblaciones han sido reducidas en un 50% principalmente como resultado de tala, pastoreo e incendios (Thomas, 2016).

Características y uso de la madera / Calidad de la madera en rodales naturales

La madera de *Picea mexicana* es blanca y de olor agradable (Martínez, 1963), aunque por su calidad de especie protegida, no se aprovecha como maderable. Si la especie se cultivara, tiene un buen potencial de aprovechamiento, considerando los usos que se dan en Norteamérica a las especies emparentadas como *P. engelmannii*, la cual tiene importancia económica por su madera, usada en la industria papelera y en construcción. En general, la madera de árboles de crecimiento lento a gran altura tiene un uso especializado en la fabricación de instrumentos musicales (guitarras acústicas, violines y arpas); se usa también en menor medida como árbol de Navidad. De manera que hay diversos usos potenciales para esta especie cuando llegue a ser producida en plantaciones comerciales.

Otros usos

Como elemento de altas elevaciones, es resistente al viento y a las bajas temperaturas y, de reproducirse en vivero, tiene un buen potencial para usarse en cortinas rompevientos. Asimismo, por ocupar las partes altas de las cuencas tiene un importante valor ambiental como generadora de suelo y en la captación de agua y captura de carbono.

Clave de la especie en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos: 4386.

2.3.3 Estado de conservación

Picea mexicana está enlistada como especie "En peligro de extinción" (P) bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010 y en el Anexo Normativo III (DOF, 2015). Aunque cada una de las tres poblaciones probablemente contiene varios miles de árboles (Ledig *et al.*, 2000a, 2002), estas son marcadamente disyuntas (particularmente las de la Sierra Madre Oriental y la de la Sierra Madre Occidental), restringidas a los picos más altos. La especie amerita tratamiento como una de las coníferas más críticamente en peligro de todo el mundo, con un alto riesgo de extincción debido a estresores como el fuego y el cambio climático (Earle y Frankis, 2018). Para la IUCN, el estatus de conservación de *P. mexicana* es En Peligro (Endangered, EN) (Thomas y Farjon, 2013c).

En 1975, la población de El Carmen fue devastada por un incendio aparentemente causado por excursionistas (Rushforth, 1986; Sánchez de la Peña, com. pers., 2021). Las otras poblaciones son también pequeñas y vulnerables. Sin embargo, el hecho de

Lámina 7. *Picea mexicana* en La Marta, Arteaga, Coah., con *Abies vejarii, Pinus* spp.*, Populus tremuloides* y *Salix paradoxa.* Fotografías: A-C: C. Wehenkel ; D: E. Mendoza.

que hace 60 años la especie pudiera crecer en una cañada ubicada a alrededor de 2700 m de elevación (como indica el registro del Tipo, Martínez, 1961), indica que su distribución potencial es ligeramente más amplia altitudinalmente de lo que se ha calculado previamente.

Picea mexicana es una especie de gran valor ambiental por formar parte de la vegetación de la parte alta de cuencas. Su conservación requiere que se vigile y controle la tala, el pastoreo y los incendios. Para planificar esta conservación es importante monitorear periódicamente las poblaciones; es una especie de muy lento crecimiento que ha sido afectada por las sequías de las últimas décadas (Chaparro-Gómez, 2014). Su conservación *ex situ* implica la recolección de semillas de todos los rodales y el establecimiento de poblaciones en zonas adecuadas debe ser una prioridad (Ledig *et al.,* 2002, 2010; Mendoza-Maya *et al.,* 2015; Thomas, 2016).

REFERENCIAS

Chaparro Gómez, L.E. 2014. Incremento de volumen del arbolado en sitios permanentes establecidos en poblaciones de *Picea mexicana* Martínez en México. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 62 p.

Cervantes Angel, G.E. 2014. Crecimiento de pináceas asociadas a poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez en México. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 64 p.

Cervantes Martínez, R. 2000. Detección de patógenos presentes en tres especies de semillas forestales (*Abies vejari* Martínez, *Pinus culminicola* A&B, y *Picea engelmannii* (Perry) Engelm. var. *mexicana* Martínez). Tesis Ingeniero Agrónomo Parasitólogo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 60 p.

Cibrián-Tovar, D., B.H. Ebel, H.O. Yates III and J.T. Méndez-Montiel. 1986. Insectos de conos y semillas de las coniferas de México/Cone and seed insects of the mexican conifers. Universidad Autónoma Chapingo-USA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station Asheville, North Carolina. 110 p.

CONABIO-CONANP, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2009. Pinabete de Nuevo León (*Picea martinezii*). Fichas de especies mexicanas. CONABIO- CONANP, México, D.F.DOF: 21/12/2015.

Diario Oficial de la Federación. PROYECTO de Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010.

Dominguez-Guerrero, I.K., S.R. Mariscal-Lucero, J.C. Hernández-Díaz, B. Heinze, J.Á. Prieto-Ruiz, C. Wehenkel. 2017. Discrimination of *Picea chihuahuana* Martinez populations on the basis of climatic, edaphic, dendrometric, genetic and population traits. PeerJ 5:e3452 https://doi.org/10.7717/peerj.3452

Earle, C.J. 2020. The Gymnosperm Database. Disponible en: http://www.conifers.org (Consultada 10 de junio de 2020).

Earle, C.J. and M.P. Frankis. 2018. *Picea engelmannii* subsp. *mexicana* en The gym-

nosperm database. Disponible en: https://www.conifers.org/pi/Picea_engelmannii_mexicana.php (Consultada 30 de enero de 2019).

Enkerlin-Hoeflich, E. C. 1995. Comparative ecology and reproductive biology of three species of Amazona parrots in northeastern Mexico. Tesis doctoral. Texas A&M University, College Station, TX. 184 p.

Enkerlin-Hoeflich, E.C., M.A. Cruz-Nieto, C. Macías-Caballero, J. Quesada-Mejorada, N.F.R. Snyder. 1997. Reporte Final B116: Status, distribución, ecología y conservación de las Cotorras Serranas (*Rhynchopsitta pachyrhyncha* y *R. terrisi*) en el Norte de México. Monterrey, México, CONABIO. Comisión Nacional para el Estudio y Uso de la Biodiversidad. 65 p.

Enkerlin-Hoeflich, E.C., C. Macías-Caballero, M.A. Cruz-Nieto, T. Monterrubio-Rico, N.F.R. Snyder. 1998. Reporte Final K016: Status, distribución, ecología y conservación de las Cotorras Serranas (*Rhynchopsitta pachyrhyncha* y *R. terrisi*) en el Norte de México: 2a. fase. Monterrey, ITESM. 98 p.

Enkerlin-Hoeflich, E.C., C. Macías Caballero, T. Monterrubio Rico, M.A. Cruz Nieto, N.F.R. Snyder, D. Venegas Holguin, J. Cruz Nieto, G. Ortiz Maciel, G., J.J. González Elizondo y E. Stone. 2001. Status, distribución, ecología y conservación de las cotorras serranas (*Rhynchopsitta pachyrhyncha* y *R. terrisi*) en el norte de México: 3a fase. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Centro de Calidad Ambiental. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. Q050. México D.F. 150 p.

Estrada Castillón, A.E., J.A. Villarreal Quintanilla, M.M. Salinas Rodríguez, C.M. Cantú Ayala, H. González Rodríguez y J. Jiménez Pérez. 2014. Coníferas de Nuevo León, México. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. 145 p.

Estrada-Torres, A. 2004. Hongos ectomicorrizógenos y myxomycetes asociados con *Picea chihuahuana* en la Sierra Tarahumara. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. X001. México D. F.

Fernández Guzmán, P. 2014. Evaluación y Caracterización de Micorrizas Asociadas al Bosque de *Picea mexicana* Martínez en la Sierra el Coahuilón, Arteaga, Coahuila. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 64 p.

Flores-López, C. 2014. Líneas para la conservación de los recursos genéticos de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, Facultad de Forestal y Agronomía. Pinar del Río, Cuba.

Flores-López C., J. López-Upton y J.J. Vargas-Hernández. 2005. Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. Agrociencia 39: 117-126.

Flores-López, C., C.G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2012. Reproductive indicators in natural populations of *Picea martinezii* T. F. Patterson. Revista Forestal Baracoa 31(2): 49–58.

Fulé, P.Z., J. Villanueva-Díaz y M. Ramos-Gómez. 2005. Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. Canadian Journal of Forest Research 35(2): 320-330. https://doi.org/10.1139/x04-173

Galván Moreno, R., L.H. Navarro Galván y J.M. Villela Suárez. 2016. Manual para la identificación de Altos Valores de Conservación en bosques templados de México. La experiencia del suroeste del estado de Chihuahua. Comisión Nacional Forestal – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 79 p.

García, E. 1998. *Climas* (Clasificación de Köppen, modificada por García) Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México.

García-Arévalo, A. 2008. Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea chihuahuana* Martínez del Norte de México. Polibotánica 25: 45-68.

García Ayala, H. 2012. *Picea chihuahuana* Martínez (Pinaceae). Monografía presentada como Tesis, Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 61 p.

Gordon, A.G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. Ecology 49: 880-896.

Jaramillo-Correa, J.P., J. Beaulieu, F.T. Ledig and J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. Journal of Molecular Ecology 15(10): 2787-2800.

Kong-Luz, A., G. Galindo-Flores, A. Estrada-Torres, V.M. Chávez y R. Bye. 2000. Hongos ectomicorrizógenos asociados con *Picea chihuahuana*. Memorias del VII Congreso Nacional de Micología, Querétaro, México.

Ledig F.T. 2012. Climate change and conservation. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 8: 57-74.

Ledig F.T., V. Jacob-Cervantes, P.D. Hodgskiss and T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. Evolution 51: 1815-1827.

Ledig, F.T., B. Bermejo-Velázquez, P.D. Hodgskiss, D.R. Johnson, C. Flores-López and V. Jacob-Cervantes. 2000b. The mating system and genic diversity in Martinez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. Canadian Journal of Forest Research 30(9): 1156-1164.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López and M.A. Capó-Arteaga. 2000a. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47(2): 71-88.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3(2): 113-122.

Ledig, F.T., Hodgskiss, P.D., Krutovskii, K.V., Neale, D.B. and Eguiluz-Piedra, T. 2004. Relationships among the spruces (*Picea*, Pinaceae) of southwestern North America. Systematic Botany 29(2): 275-295.

Ledig, F.T., G.E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero and C. Flores-López. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. American Journal of Botany 97: 970-987.

López Martínez, J.I. 2018. Regeneración natural en poblaciones de *Picea martinezii* T.F. Patterson distribuidas en el noreste de México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N.L. 97 p.

Martínez, M. 1961. Una nueva especie de *Picea* en México. Anales de Instituto de Biología 32: 137-142.

Martínez, M. 1963. *Las Pináceas Mexicanas*, tercera edición. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 400 p.

Melgoza Castillo, A., O. Rivero Hernandez, C. Pinedo Alvarez y H.R. Bolanos Garcia. 2016. Especies indicadoras para la Sierra Tarahumara. Proyecto Tarahumara Sustentable. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México. 36 p.

Mendoza-Maya, E., J. Espino-Espino, C.Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J.J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. Revista Fitotecnia Mexicana 38(3): 235-247.

Monterrubio-Rico, T.C. y E. Enkerlin-Hoeflich. 2004. Variación anual en la actividad de anidación y productividad de la cotorra serrana occidental (*Rhynchopsitta pachyrhyncha*). Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología 75(2): 341-354.

Moreno-Fuentes, A., L. Pérez-Ramírez, J. Cifuentes, R. García-Sandoval, R. Garibay, J.L. Villarruel-Ordaz, S. Sierra y G. Vidal. 1997. Micetobiota asociada a un bosque mixto de *Picea chihuahuana* en el municipio de Bocoyna, Chihuahua. Memoria del VI Congreso Nacional de Micología, Tapachula, México.

Musalem, M.A., C.T. Lomas-Barrie y M. Mendoza. 2008. Ficha técnica de Picea engelmannii subsp. mexicana. En: Musalem, M.A. (compilador). Fichas de 27 especies

de coníferas incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2001. INIFAP-CIRCE-CEVAMEX. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto No. DK003. México, D.F. https://www.gob.mx/conabio

Narváez Flores, R. 1984. Contribución al conocimiento de la ecología de *Picea chihuahuana* Martínez. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. 100 p.

Narváez Flores, R. y J. Sánchez Córdoba. 1985. Plan integral para la protección y fomento de *Picea chihuahuana* Martínez. Edit. Centro de Investigaciones Forestales del Norte, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIFAP), Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Chihuahua, Chih., México. 19 p.

Narváez Flores, R., J. Sánchez Córdoba y A. Olivas Meza. 1983. Distribución y población de *Picea chihuahuana*. Nota Técnica No. 6, PR-2. Centro de Investigaciones Forestales del Norte, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. 11 p.

Narváez Flores, R., Wrigth, P., Alvídrez, S., Martínez, M., Iglesias, L., Domínguez, L., Gómez, V., Rodríguez, S., Montes, G., Molina, J., Martínez, C., Bojórquez, A., Rodríguez, C., y R. Reyes. 2004. Selección y Desarrollo de Criterios e indicadores para evaluar la Sustentabilidad del Manejo Forestal. Publicación especial Núm 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRNOC. Campo experimental Madera. Chihuahua, Chih., México.

Noriega Villa, J. 2021. Flora y vegetación del Área de Protección de Recursos Naturales Quebrada de Santa Bárbara, Pueblo Nuevo, Durango, México. Tesis Licenciado en Biología. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Durango, México.

Ortega-Rosas, C.I., M.C. Peñalba and J. Guiot. 2008. Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data. Review of Palaeobotany and Palynology 151 (2008) 1-20.

Patterson, T.F. 1988. A new species of *Picea* (Pinaceae) from Nuevo León, México. SIDA, Contributions to Botany 13(2): 131-135, https://www.jstor.org/stable/41966770

Pinedo-Alvarez, C., M. Renteria-Villalobos, V. Aguilar-Soto, J.H. Vega-Mares and A. Melgoza-Castillo. 2019. Distribution dynamics of *Picea chihuahuana* Martínez populations under different climate change scenarios in Mexico. Global Ecology and Conservation 17, January 2019, e00559, https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00559

Quiñonez-Martínez, M., F. Garza-Ocañas. 2000. Taxonomía, ecología y distribución de hongos macromicetos de Bosque Modelo Chihuahua. Memoria del VII Congreso Nacional de Micología, Querétaro, México.

Quiñonez-Martínez, M., F. Garza-Ocañas, M. Vargas-Medrano. 2003. Diversidad y abundancia de hongos ectomicorrízicos y vegetación asociada en el municipio de Bocoyna, Chihuahua. Memoria del VIII Congreso Nacional de Micología, Toluca, México.

Rzedowski J. 1983. Vegetación de México. Limusa, Ciudad de México, México. 432 p.

Rushforth, K. 1986. Mexico's spruces - rare members of an important genus. Kew Magazine 3(3): 119-124.

Sáenz-Romero, C., G.E. Rehfeldt, N.L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu and B.A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. Climatic Change 102: 595-623.

Sáenz-Romero, C., E. Mendoza-Maya, E. Gómez-Pineda, A. Blanco, A.R. Endara-Agramont, R. Lindig-Cisneros, J. López-Upton, O. Trejo-Ramírez, C. Wehenkel, D. Cibrián-Tovar, A. Plascencia-González, C. Flores-López, J. Vargas-Hernández. 2020. Recent evidence of Mexican temperate forest decline, need for ex situ conservation, assisted migration and translocation of species ensembles as an adaptive management to face projected climatic change impacts in a megabiodiverse country. Canadian Journal of Forest Research 50(1): , DOI: 10.1139/cjfr-2019-0329

Sánchez Córdoba, J. 1984. *Picea chihuahuana*, una Conífera en Peligro de Extinción. Ciencia Forestal 9(51): 51-63.

Sánchez Córdoba, J. y R. Narváez-Flores. 1990. Plan integral para la protección y fomento de *Picea chihuahuana* Martínez. Ecosistemas Forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos 1: 37-55.

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental -Especies nativas de México de flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación (Segunda sección). 77 p.

Thomas, P. 2016. *Picea mexicana*. Threatened Conifers of The World, en: http://threatenedconifers.rbge.org.uk/taxa/details/885. Downloaded on 20 May 2019.

Thomas, P. and A. Farjon. 2013a. *Picea chihuahuana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32479A2820455. https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32479A2820455.en. Downloaded on 28 August 2021.

Thomas, P. and A. Farjon. 2013b. *Picea martinezii*. The IUCN Red List of Threatened Species. IUCN. 2013: e.T32996A2829306. doi:10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32996A2829306.en, Downloaded on 29 May 2019.

Thomas, P. and A. Farjon. 2013c. *Picea engelmannii* subsp. *mexicana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T33922A2839137. http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T33922A2839137.en. Downloaded on 29 May 2019.

Valdes Castillo, V.A. 2018. Fenología y potencial de almacenamiento de carbono de *Picea martinezii* T.F. Patterson en ecosistemas forestales de Nuevo León. Tesis Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. 91 p.

Van Devender, T.R., R. Thompson and J. Betancourt. 1987. Vegetation history of the deserts of Southwestern North America; the nature and timing of the Late Wisconsin-Holocene transition. P. 323–352 in: Ruddiman, W.F., WrightJr. Jr., H.E. (Eds.), North America and Adjacent Oceans During the Last Deglaciation. The Geology of North America. Geological Society of America, Boulder, Colorado.

Villalba Lugo, R.E. 2009. Diversidad y estructura de especies leñosas en poblaciones de *Picea martinezii* T.F. Patterson en México. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 68 pp.

Wehenkel, C. and C. Sáenz-Romero. 2012. Estimating genetic erosion using the example of *Picea chihuahuana* Martínez. Tree Genetics & Genomes 8(5): 1085-1094, https://doi.org/10.1007/s11295-012-0488-5

GENÉTICA DE LAS PICEAS EN MÉXICO

Christian Wehenkel[1*], J. Jesús Vargas Hernández[2], Celestino Flores López[3], Carmen Zulema Quiñones Pérez[4]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] Colegio de Posgraduados, Montecillos, Estado de México, México
[3] Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Coahuila, México
[4] Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Guadiana, Durango, C.P. 34371, México
* Autor de correspondencia: Christian Wehenkel, wehenkel@ujed.mx

3.1 INTRODUCCIÓN

La diversidad genética es un factor importante para considerar en los planes de manejo (Newton *et al.,* 1999), pues influye en la capacidad evolutiva y la adaptabilidad de las poblaciones de especies a las condiciones ambientales, que están en constante cambio, en el mediano y largo plazo; además, influye en la viabilidad de poblaciones e individuos en el corto plazo (Frankham *et al.,* 2002).

Las especies mexicanas de *Picea* se han estudiado genéticamente con diversos marcadores. Se han realizado estudios de diversidad genética con marcadores isoenzimáticos para *Picea chihuahuana* (Jacob, 1994; Ledig *et al.,* 1997), *Picea martinezii* (Ledig *et al.,* 2000a) y *Picea mexicana* (Ledig *et al.,* 2002), en los que se ha determinado la estructura genética analizando de 18 a 24 loci. También, se han realizado estudios con marcadores moleculares, incluidos algunos microsatélites (SSR) para *P. mexicana* (Bouillé *et al.,* 2011) y para *Picea chihuahuana* (Jaramillo-Correa *et al.,* 2006), polimorfismos de longitud de fragmento amplificado (AFLP) para *Picea chihuahuana* (Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012), así como polimorfirmos de un solo nucleótido (SNPs) en *P. mexicana* y *P. martinezii* (Pavy *et al.,* 2013; Mendoza-Maya y Wehenkel, 2021).

Las poblaciones genéticamente diferenciadas suelen ser objeto de preocupación en términos de conservación debido a la posible reducción de la diversidad genética den-

tro de las poblaciones a través de la deriva genética y la endogamia, lo que puede reducir la adaptabilidad a futuros entornos (Frankham *et al.,* 2002). Sin embargo, una mayor diferenciación genética entre poblaciones también puede conducir a una mayor diversidad genética global de una especie, similar a una mayor diversidad paisajística (Beta). Por lo tanto, la predicción de la diferenciación genética entre poblaciones puede evaluar los factores individuales, sociales, ecológicos e históricos que podrían provocar la diferencia genética de la población (Ronce, 2007; Lombal *et al.,* 2020).

3.2 Diversidad genética de las piceas mexicanas

Los resultados revelan que *P. mexicana* tiene la diversidad genética promedio más alta por población de las tres piceas conocidas para México, a pesar de que existen solamente tres poblaciones documentadas para esa especie. Por el contrario, *P. chihuahuana* tiene la diversidad genética promedio más pequeña por población entre las tres especies, a pesar de que tiene 40 poblaciones conocidas (Ledig *et al.,* 2000b; Quiñones-Pérez *et al.,* 2014a, 2014b, 2017; Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012) (Cuadro 3.1). Esta diferencia puede explicarse por el tamaño promedio de la población: *P. mexicana* tiene por término medio las poblaciones más grandes, pero *P. chihuahuana* tiene las más pequeñas. Y el tamaño de población está correlacionado positivamente con la diversidad genética (Frankham *et al.,* 2002).

Usando SNPs y el índice de fijación (F_{ST}), la diferenciación genética promedio entre cada una y las otras tres poblaciones conocidas de *P. martinezii* (Agua de Alardín[4], Agua Fría, El Butano y La Encantada) es de 0.023, 0.024, 0.027 y 0.033, respectivamente, mientras que entre cada población y las otras dos poblaciones reportadas de *P. mexicana* (El Mohinora, El Coahuilón y La Marta) es de 0.024, 0.025 y 0.033 (Mendoza-Maya y Wehenkel, 2021). Usando isozimas, el F_{ST} promedio entre diez poblaciones de *P. chihuahuana* es 0.185 (Ledig *et al.,* 1997), pero entre dos poblaciones (El Butano y La Encantada) de *P. martinezii* es 0.024 (Ledig *et al.,* 2000a) y entre las tres poblaciones de *P. mexicana* es 0.069 (Ledig *et al.,* 2002). En consecuencia, *P. chihuahuana* tiene la mayor diferenciación genética y *P. martinezii* la menor.

Por lo tanto, *P. martinezii* parece ser la *Picea* más susceptible en México desde la perspectiva de la genética de poblaciones (diversidad y diferenciación genética).

Picea chihuahuana se ha reportado como un excelente modelo para estimar erosión genética potencial, un proceso detrimental para la viabilidad de los individuos y las poblaciones, así como para el potencial evolutivo de la especie, que a su vez afecta el uso directo de los recursos genéticos (Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012; Wehenkel *et al.,* 2015). Estos autores encontraron una pérdida moderada de diversidad genética en la mayoría de las poblaciones estudiadas, y erosión genética significativa solamente en una población muy pequeña (San José de las Causas). Aunque un estudio posterior, también usando AFLPs (Quiñones-Pérez *et al.,* 2017), no confirmó que esté ocurriendo erosión genética en *P. chihuahuana*, sugiere que el muestreo en un mayor número de poblaciones y el uso de diferentes marcadores moleculares podría arrojar diferentes resultados.

[4] Registrada en algunos trabajos como Agua Lardín.

Cuadro 3.1 Diversidad genética de las *Picea* mexicanas.

Especie	MM	PP	P	I	L	Diversidad genética						Referencia
						H_e	H_o	%P	H	δ_T	$v_{mean,2}$	
Picea chihuahuana	mt DNA	16	16	156	16	-	-	-	0	-	-	Jaramillo-Correa *et al.*, (2006)
Picea chihuahuana	cpSSR	6	16	156	6	-	-	-	0.41	-	-	Jaramillo-Correa *et al.*, (2006)
Picea chihuahuana	AFLP	1	14	669	243	-	-	-	-	-	1.5	Simental-Rodríguez *et al.*, (2014)
Picea chihuahuana	AFLP	1	5	254	319	-	-	-	-	0.3	-	Wehenkel y Sáenz-Romero (2012)
Picea chihuahuana	Iso	-	10	164	24	0.09	0.07	27	-	-	-	Ledig *et al.*, (1997)
Picea martinezii	Iso	-	2	54	22	0.11	0.10	32	-	-	-	Ledig *et al.*, (2000)
Picea martinezii	SNP	-	4	50	23,415	0.12	0.11	-	-	-	-	Mendoza-Maya y Wehenkel (2021)
Picea mexicana	Iso	-	3	82	18	0.13	0.14	35	-	-	-	Ledig *et al.*, (2002)
Picea mexicana	SNP	-	3	50	37,097	0.20	0.18	-	-	-	-	Mendoza-Maya y Wehenkel (2021)

MM = marcador molecular, mtDNA = ADN mitocondrial, cpSSR = microsatélite del cloroplasto, AFLP = polimorfismo de longitud de fragmento amplificado, Iso = isozimas, SNP = polimorfismos de un solo nucleótido, PP = número de combinaciones de pares de cebadores, P = número de poblaciones, I = número de individuos (semillas) incluidos por poblaciones, L = número de loci, H_e = heterocigosidad esperada, H_o = heterocigosidad observada, H = diversidad haplotípica total, %P = porcentaje de loci polimórficos, δ_T = diferenciación total de Gregorius, $v_{mean,2}$ = diversidad genética media Fuente: Wehenkel *et al.*, (2017) modificado.

Mejoramiento genético

No hay aún experiencias de mejoramiento genético para ninguna de las piceas mexicanas.

3.2.1 Estudios genéticos en *Picea martinezii*

Para determinar patrones de similitud entre *P. martinezii*, *Picea engelmannii* var. *mexicana* (*P. mexicana*), *P chihuahuana*, *P. engelmannii*, *P. pungens* y *P. sitchensis* se han usado caracteres morfológicos, fitoquímicos (compuestos fenólicos y terpenos) y datos moleculares. Los análisis mostraron que *Picea martinezii* y *P. chihuahuana* son claramente distintos, lo que justifica la retención de *P. martinezii* como una especie separada (Taylor *et al.*, 1994).

Los indicadores reproductivos y de germinación son bajos en *Picea martinezii*, lo que sugiere que la especie sufre de depresión endogámica, la cual es más marcada en el sitio La Encantada (Flores-López *et al.,* 2012; Flores-López 2014). Estos autores atribuyen la baja eficiencia en la producción de semillas llenas a una producción limitada de polen, con un nulo intercambio genético entre poblaciones y una tasa alta de autofecundación y cruzamiento entre individuos emparentados (Flores-López *et al.,* 2012). También se ha encontrado una variación fenotípica significativa entre y dentro de poblaciones en diferentes características morfológicas y anatómicas que podrían tener un valor adaptativo, como son el número de estomas, longitud y grosor de acículas y tamaño de conos y semillas (Flores-López 2014). Este autor señala que estas y otras características morfo-anatómicas fueron suficientes para diferenciar a los individuos de diferentes poblaciones de la especie, excepto los de las poblaciones de Agua Fría y Agua de Alardín, que están separadas por una distancia aproximada de 2.5 km.

En un estudio con 41 muestras de las cuatro poblaciones de *P. martinezii* en el que se evaluaron 18 sistemas enzimáticos (32 loci en total), se encontró 31.2 % de loci polimórficos, con dos alelos privados en la población de La Encantada (Flores-López 2014). La diversidad genética promedio estimada en esta especie (H_e = 0.086) fue ligeramente menor que la reportada por Ledig *et al.,* (2002) en *Picea mexicana*, pero el grado de diferenciación genética entre poblaciones fue mayor (F_{st} = 0.100) en *Picea martinezii*. Sin embargo, el nivel de diversidad genética estimado en este estudio es ligeramente menor al reportado por Ledig *et al.,* (2000a) para las poblaciones de El Butano y La Encantada, con base en 13 sistemas enzimáticos (22 loci en total). En ese estudio se encontraron 9 loci polimórficos (40.9 %), 1.4 alelos por locus, ocho alelos privados y una diversidad genética promedio (H_e) de 0.11.

Ledig *et al.,* (2000a) demostraron que la tasa de cruzamiento multilocus estimada en las dos poblaciones naturales evaluadas en *P. martinezii* varió entre 0.399 y 0.685, una de las más bajas reportadas para especies de coníferas, que presentan un sistema reproductivo preferencialmente de polinización cruzada. Sin embargo, a pesar de la proporción elevada de autofecundación estimada, del valor reducido de H_e encontrado en la especie y de la baja eficiencia reproductiva reportada, con una elevada proporción de semillas vanas, no se detectó una deficiencia significativa de heterocigotes en la población, lo cual es evidencia de un fuerte proceso de selección natural en contra de los homocigotes resultado de la autofecundación y cruzamiento entre parientes cercanos. Además, el moderado nivel de diferenciación genética entre poblaciones se debe en mayor grado a la población de La Encantada, pues cuando se excluye esta población del análisis el valor de F_{st} se reduce a 0.027 (solo 2.7 % de la diversidad total se encuentra entre poblaciones). Estos datos son similares a los obtenidos por Ledig *et al.,* (2000a), con un valor de Fst de 0.024 entre las dos poblaciones incluidas en su estudio, indicando un reducido nivel de diferenciación genética asociado a un moderado flujo genético.

En otro estudio que incluyó una muestra de cuatro individuos de *Picea martinezii* de las poblaciones de La Tinaja y Cañón El Butano en Nuevo León, no se encontró diversidad genética en las secuencias de mtDNA and cpDNA analizadas (Jaramillo-Correa *et al.,* 2006), lo cual confirma la reducida variación genética presente en general en esta especie.

Rushforth (1986) hace notar que un riesgo para *P. martinezii* (tratada por él como *P. chihuahuana*) es la reducida diversidad genética por el aislamiento y los riesgos de erosión genética asociados a las poblaciones pequeñas y aisladas. Dado que hay muy pocos árboles en cada generación, hay una tendencia a la pérdida de diversidad genética (por pérdida al azar de genes). Cuando esto ocurre a través de varias generaciones, además de la erosión genética, se aumenta la endogamia y la población se hace genéticamente similar, lo que reduce su capacidad de adaptarse a las nuevas condiciones ambientales asociadas al cambio climático o a eventos aleatorios extremos, incluyendo procesos demográficos. El porcentaje muy bajo de semillas viables reportado para *P. martinezii* refleja esta situación. Cada población puede retener una parte del pool de genes (o sea, del número total de genes de la especie) pero si las poblaciones están muy aisladas entre sí y no se pueden entrecruzar, no se da la oportunidad para generar nuevas combinaciones genéticas que aumenten la viabilidad potencial de las poblaciones a las condiciones ambientales fluctuantes.

El porcentaje de entrecruzamiento y el nivel medio de heterocigotos en *P. martinezii* son menores que los reportados para la mayoría de las especies emparentadas del género (CONABIO-CONANP, 2009).

3.2.2 Estudios genéticos en *Picea mexicana*

Las similitudes en filogenias de cloroplasto sugieren una evolución reticulada en el grupo y no sustentan reducir a *P. mexicana* bajo *P. engelmannii* (Bouillé *et al.,* 2011). Ledig *et al.,* (2004) encontraron que la menor distancia genética (D) entre *P. engelmannii* and *P. mexicana* (0.100) se encuentra entre la población de *P. mexicana* de la Sierra el Coahuilón, Coahuila y una población de *P. engelmannii* de Colorado y no, como podría esperarse por su mayor cercanía geográfica, con las poblaciones de *P. engelmannii* de las montañas Chiricahuas de Arizona. La distancia genética entre *P. mexicana* y la *P. engelmannii* de las Chiricahuas varió de 0.153 a 0.164.

En el estudio de Ledig *et al.,* (2002) sobre tres poblaciones naturales de *P. mexicana* se encontró un porcentaje de loci polimórfico que varió entre 33.3 % y 38.9 %, con un promedio de 1.4 alelos por locus. Sin embargo, la diversidad genética isoenzimática en las tres poblaciones muestreadas fue moderada (He = 0.125), similar a los valores encontrados en otras especies de coníferas con una distribución natural restringida.

La distancia genética entre las poblaciones de la Sierra Madre Oriental y la población de la Sierra Madre Occidental fue un orden de magnitud mayor que entre las dos poblaciones de la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, el grado de diferenciación genética entre las poblaciones (F_{st}) fue bajo, representando solo 6.9 % de la diversidad génica total estimada, lo cual apunta a una divergencia genética relativamente reciente entre las poblaciones. Aunque la población de *P. mexicana* de la Sierra Madre Occidental tiene más de 11,000 individuos y por lo tanto se espera que no haya endogamia, en las poblaciones de la Sierra Madre Oriental muy probablemente ocurre endogamia, ya que tienen un menor tamaño. El estudio realizado por Ledig *et al.,* (2002) demostró que el sistema reproductivo mantiene un porcentaje elevado de cruzamiento entre individuos, con una proporción de autofecundación que varió entre 19 y 41 % entre poblaciones,

incluyendo efectos de endogamia debido al cruzamiento entre individuos emparentados. A pesar de ello, la heterocigosidad observada fue mayor que la esperada, con índices de fijación (F_{is}) negativo, lo cual implica que existe un proceso de selección muy fuerte en contra de los individuos homocigotes y endogámicos.

3.3 Hibridación

Picea martinezii se encuentra separada por cientos de kilómetros de sus parientes más cercanos: unos 1000 km al sureste de las poblaciones más australes de *Picea pungens* (en el sureste de New Mexico) y más de 450 km al oriente de *Picea chihuahuana* en Durango. Por lo tanto, es muy improbable que presente hibridación natural con otras especies (por lo menos en la época actual). Rushforth (1986) sugirió que podría haber polinización cruzada entre *P. martinezii* (a la que en ese trabajo aún llamaba Chihuahua spruce de Nuevo León) y *P. mexicana*, la cual crece en sitios más elevados en los límites entre Coahuila y Nuevo León.

En cuanto a *Picea mexicana*, Taylor y Patterson (1980) consideraron a la población del Cerro Mohinora como de posible origen híbrido y la trataron con el nombre informal de *Picea* "hybrida". Su hipótesis de origen híbrido de la población de *P. mexicana* en el Mohinora se sustenta en la gran variación entre los individuos de esa población, inconsistente con el aislamiento y el resultante flujo genético restringido (a menos que un genoma híbrido esté involucrado). Dado que la población de *P. mexicana* en el Mohinora está a pocos kilómetros de distancia de *Picea chihuahuana* Martínez, existe una alta probabilidad de que ocurra alguna polinización cruzada entre poblaciones.

Igualmente, no puede descartarse una hibridación de origen antiguo, de cuando existieron más poblaciones que pudieran servir como "puente" para mezcla con otras especies de picea del norte. Sin embargo, Ledig *et al.,* (2004), encuentran que la relación entre *P. mexicana* y la de las montañas Chiricahuas, al sur de Arizona no permite aceptar que hubo un puente genético entre ellas, ya que la frecuencia de alelos en la población de las Chiricahuas fue "definitivamente no típica" de *P. mexicana* y cae claramente en el rango de variación esperado en *P. engelmannii*.

Las poblaciones de *P. mexicana* de la Sierra Madre Oriental, por otra parte, están alejadas de otras piceas y, por lo tanto, sus posibilidades de hibridación son bajas.

3.4 Conservación genética de *P. martinezii*

In situ

Flores-López (2014) evaluó poblaciones naturales de *P. mexicana* y de *P. martinezii* para proponer líneas de conservación genética, basado en datos ecológicos, morfoanatómicos y genéticos. Para la conservación *in situ* de *P. martinezii*, Mendoza-Maya *et al.,* (2015) plantean la protección, el incremento de la diversidad genética y la expansión de las tres únicas poblaciones de la especie.

Estas dos especies representan un reservorio genético de gran valor como parte del grupo de especies de distribución más austral (junto con *P. chihuahuana*), que podrían tener mejor adaptación al cambio climático.

Ex situ

Aunque lo ideal es que las especies de *Picea* sean conservadas *in situ*, es conveniente que sean también cultivadas en otros sitios. La estrecha tolerancia ecológica de *P. martinezii*, indicada por la extensión limitada de los sitios en donde se desarrolla, parecen indicar que la especie puede ya estar ocupando todos los sitios en donde puede crecer, por lo que también es importante su conservación *ex situ* (Rushforth, 1986).

Una de las estrategias de conservación de especies *ex situ* son los jardines botánicos (Shaw y Hird, 2014), donde uno de los objetivos es la conservación a largo plazo de especies en riesgo. Sin embargo, en nuestro país la familia Pinaceae (entre otras) requiere de mayor atención y esfuerzo, estando poco representada en los jardines botánicos mexicanos (Lascuráin *et al.,* 2009). Al menos para *Picea martinezii*, no se tiene un registro en jardines botánicos mexicanos, sin embargo, esta especie se encuentra en conservación en diferentes jardines botánicos del mundo, donde se tienen pocos individuos y se han aprovechado para realizar investigaciones, principalmente en la diferenciación morfológica de piceas, así como aspectos de adaptación. Es importante señalar que *Picea martinezii* es una de las especies en estatus de riesgo que deben ser conservadas en colecciones *ex situ* (Shaw y Hird, 2014).

Entre los jardines botánicos donde se encuentran individuos de *Picea martinezii* está el Arboretum de Villardebelle, Francia, que tiene como objetivo de conservar genes de coníferas del mundo, en peligro de extinción. Este arboretum se encuentra en el departamento de l´Aude al Sur-Oeste de Francia, a una latitud de 43° 01´N y una longitud 2° 23´ E, entre los 510 y 670 m snm, posee una superficie de 6 ha en cuatro lugares diferentes y una distancia al mar de 53 kilómetros, con microclimas diferentes debido a la pendiente, exposición al sol y al viento y con una precipitación media anual 1074 mm (Arboretum de Villardebelle, 2001).

En otros jardines botánicos de Europa también se encuentran individuos de *Picea martinezii*, por ejemplo, en el Jardín Botánico de Ginebra, Suiza (Jardín Botánico de Ginebra, 2020) (https://www.ville-ge.ch/cjb/index_en.php;https://www.ville-ge.ch/cjb/jardin_cat_en. php). En el Arboretum Wespelaar, Haacht, al norte de Bélgica, se tienen tres árboles de *P. martinezii* cuyas muestras provienen de El Butano, Nuevo León, México; esas plantas presentan buen crecimiento y están clasificadas como plantas de especial interés (Foundation Arboretum Wespelaar, 2020). También, se tienen reportados individuos en jardines botánicos y plantados en terrenos particulares en América, como en el arboretum J.C. Raulston ubicado en la Universidad de Carolina del Norte (J.C. Raulston Arboretum, 2020) y en la propiedad de Frank Callahan en Central Point, OR, Estados Unidos de América (Adams y Callahan, 2014).

Para la conservación *ex situ*, Mendoza-Maya *et al.,* (2015) proponen el establecimiento de poblaciones en sitios fuera del área de distribución natural de las especies, en

donde se ha proyectado que ocurrirá el clima que les es propicio. Particularmente para *P. martinezii*, proponen que al menos 3092 individuos se establezcan en la región de Tlatlauquitepec, Puebla, con plantas originadas de una mezcla de semillas recolectadas de árboles al azar de poblaciones específicas.

La anterior propuesta es de suma importancia, ya que considerando seis escenarios de cambio climático (tres modelos de circulación global combinados con dos escenarios de gases de efecto invernadero, uno de elevadas emisiones y otro de bajas emisiones), se ha proyectado que el hábitat climático propicio para esta especie se reducirá severamente en la región donde se distribuye actualmente para las décadas centradas en el año 2060 y 2090, pero surge un hábitat climático disponible dentro de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (límites de los estados de Michoacán y Estado de México), en La Malinche (Tlaxcala y Puebla), en la Sierra Norte de Puebla y en Cofre de Perote y Pico de Orizaba (límites de Puebla y Veracruz) (Ledig *et al.,* 2010). Por ello, la conservación *ex situ* parece ser una opción indispensable para fin de siglo, si consideramos los impactos esperados del cambio climático.

3.5 Conservación genética de *P. mexicana*

In situ

Flores-López (2014) evaluó poblaciones naturales de *P. mexicana* y de *P. martinezii* para proponer líneas de conservación genética, basado en datos ecológicos, morfoanatómicos y genéticos.

Ambas especies representan un reservorio genético de gran valor como parte del grupo de especies de distribución más austral (junto con *P. chihuahuana*), que podrían tener mejor adaptación al cambio climático.

Para la conservación *in situ* de *P. mexicana*, Mendoza-Maya *et al.,* (2015) plantean la protección, el incremento de la diversidad genética y la expansión de las tres únicas poblaciones conocidas de la especie.

Una plantación de *Picea mexicana* establecida por el ingeniero Sergio Braham Sabag en su predio ubicado en el Cerro el Coahuilón, Arteaga, Coahuila tiene 16 años y está a 4.5 kilómetros de distancia de los primeros árboles. Se ubica a 3,022 m snm, con coordenadas 25°13’21.13”N, 100°18’2.09”O (Ing. Sergio Braham Sabag, com. pers. 2020).

Ex situ

La situación ideal, desde todos los puntos de vista (ambiental, económico y ético) es que las especies sean conservadas *in situ*. Sin embargo, con el fin de conservar a especies que se encuentren en estado muy vulnerable, como es el caso de *P. mexicana*, la conservación *ex situ* es una opción que permite complementar los esfuerzos de conservación *in situ*.

Al igual que en el caso de *P. martinezii*, para *Picea mexican*a se requieren acciones urgentes para evitar la pérdida de la especie y los servicios ecosistémicos asociados. Una

de las alternativas son los jardines botánicos (Rivers *et al.,* 2015). Sin embargo, en los jardines botánicos mexicanos no hay reportes. En este sentido, se requiere de atención a este género en México, en especial porque es una especie susceptible al cambio climático (Ledig *et al.,* 2010). La conservación ex situ es prioritaria y las estructuras como jardines botánicos, arboretos y bancos de genes han incrementado bajo el escenario de cambio climático, y están siendo incluidas en las agendas políticas de países (Pritchard y Harrop, 2010).

Sin embargo, *Picea mexicana* ha sido considerada para conservación en diferentes jardines botánicos del mundo. En el Arboretum de Villardebelle, Francia, se tiene individuos en crecimiento. El arboretum se encuentra en el departamento de l´Aude al Sur-Oeste de Francia (http://www.pinetum.org/)(Arboretum de Villardebelle, 2001). También en el Jardín Botánico de Ginebra, Suiza (Conservatoire et Jardin botaniques Genéve, 2020) (https://www.ville-ge.ch/cjb/index_en.php;https://www.ville-ge.ch/cjb/jardin_ cat_en. php). En el Arboretum Wespelaar, de Haacht, al norte de Bélgica, se tienen 3 plantas de *Picea mexicana* (como *Picea engelmannii* subsp. *mexicana*); sin embargo, estas plantas presentan daños (Foundation Arboretum Wespelaar, 2020). Así también en Alemania, en el Arboretum Freiburg-Günterstal (http://www.biologie.uni-ulm.de/extern/guenterstal/spabotxt.htm#Ubicaci%C3%B3n), ubicado en Günterstal, al sur de Friburgo, se reportan individuos de *Picea mexicana* en conservación (Arboretum Freiburg-Günterstal, 2003).

Mendoza-Maya *et al.,* (2015) proponen el establecimiento de *P. mexicana* en sitios fuera de su área de distribución natural, donde se proyecte que ocurrirá el clima que le es propicio. Concretamente, sugieren establecer por lo menos 3,606 individuos de esta especie en el volcán Cofre de Perote, Veracruz, a partir de plantas originadas de una mezcla de semillas colectadas de árboles al azar de poblaciones específicas.

Esta propuesta es de suma importancia, ya que considerando seis escenarios de cambio climático (tres modelos de circulación global combinados con dos escenarios de gases de efecto invernadero, uno de elevadas emisiones y otro de bajas emisiones), se ha proyectado que el hábitat climático propicio para esta especie se reducirá severamente en la región donde se distribuye actualmente, hasta el punto de desaparecer por completo en el territorio nacional para la década centrada en el año 2060. Posteriormente, en la década centrada en el año 2090, surge un hábitat climático disponible, si bien marginal (probabilidad menor al 20 %), en el Nevado de Toluca (Edo. de México), en los volcanes Popocatépetl, Iztachíhuatl y Monte Tláloc (límites del Estado de México y Puebla), en La Malinche (Tlaxcala y Puebla), y en Pico de Orizaba y Cofre de Perote (límites de Puebla y Veracruz) (Ledig *et al.,* 2010). Por ello, la conservación *ex situ* parece ser una opción indispensable para fin de siglo, si consideramos los impactos esperados del cambio climático.

REFERENCIAS

Adams, R. P. and F. Callahan. 2014. The leaf essential oils of *Picea chihuahuana* Martinez and *P. martinezii* Patterson (Pinaceae). Phytologia 96(4): 260-263.

Arboretum de Villardebelle. 2001. *Picea mexicana* Gallery. Departamento de l'Aude, Languedoc-Rosellón, Francia. <http://www.pinetum.org/PhotoACP2.htm>, <http://www.pinetum.org/sp/PCmexicana.htm> (Consultada 22 de julio de 2020)

Arboretum Freiburg-Günterstal. 2003. Inventario. <http://www.biologie.uni-ulm.de/extern/guenterstal/frame3.htm> (Consultada 22 de julio de 2020)

Bouillé, M., S. Senneville and J. Bousquet. 2011. Discordant mtDNA and cpDNA phylogenies indicate geographic speciation and reticulation as driving factors for the diversification of the genus *Picea*. Tree Genetics & Genomes 7: 469–484.

CONABIO-CONANP. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2009. Pinabete de Nuevo León (*Picea martinezii*). Fichas de especies mexicanas. CONABIO-CONANP. México, D.F. DOF: 21/12/2015.

Conservatoire et Jardin botaniques Genéve. 2020. Living collections inventory, January 10, 2020. <https://www.ville-ge.ch/cjb/jardin_cat_en.php> (Consultada 22 de julio de 2020)

Flores-López, C. 2014. Líneas para la conservación de los recursos genéticos de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, Facultad de Forestal y Agronomía. Pinar del Río, Cuba.

Flores-López, C., C.G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2012. Reproductive indicators in natural populations of *Picea martinezii* T. F. Patterson. Revista Forestal Baracoa 31(2): 49–58.

Foundation Arboretum Wespelaar. 2020. Woody plants in the database of the Arboretum Wespelaar, *Picea engelmannii* subsp. *mexicana*. < https://www.arboretumwespelaar.be/ Default.aspx?WPID=264&L=E> (Consultada 22 de julio de 2020)

Foundation Arboretum Wespelaar. 2020. Woody plants in the database of the Arboretum Wespelaar, *Picea martinezii*. <https://www.arboretumwespelaar.be/Default.aspx?WPID=264&L=E&DNa= Picea+martinezii> (Consultada 22 de julio de 2020)

Frankham, R., J.D. Ballow and D.A. Briscoe. 2002. Introduction to Conservation Genetics. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 617 p.

Jacob, C., V. 1994. Estudio Isoenzimático de la Variación Genética de *Picea chihuahuana* en los Estados de Chihuahua, Durango y Nuevo León. Tesis profesional (Biología), ENEP-Iztacala, UNAM. México, D.F.

Jaramillo-Correa, J.P., J. Beaulieu, F.T. Ledig and J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. Journal of Molecular Ecology 15(10): 2787-2800.

J.C. Raulston Arboretum. 2020. Photographs *Picea martinezii*. NC State University. <https://jcra.ncsu.edu/resources/photographs/results.php?search=Picea+martinezii> (Consultada 22 de julio de 2020)

Lascuráin, M., R. List, L. Barraza, E. Díaz Pardo, F. Gual Sill, M. Maunder, J. Dorantes y V. E. Luna. 2009. Conservación de especies *ex situ*, en: Capital natural de México, vol. II. Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, p. 517-544.

Ledig, F.T., V. Jacob-Cervantes, P.D. Hodgskiss and T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. Evolution 51: 1815-1827.

Ledig, F.T., B. Bermejo-Velázquez, P.D. Hodgskiss, D.R. Johnson, C. Flores-López and V. Jacob-Cervantes. 2000a. The mating system and genic diversity in Martinez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. Canadian Journal of Forest Research 30(9): 1156-1164.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López and M.A. Capó-Arteaga. 2000b. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47(2): 71-88.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3(2): 113-122.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss, K. V. Krutovskii, D. B. Neale and T. Eguiluz-Piedra. 2004. Relationships among the Spruces (*Picea*, Pinaceae) at Southwestern North America. Systematic Botany 29(2): 275-295.

Ledig, F.T., G.E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero and C. Flores-López. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. American Journal of Botany 97: 970-987.

Lombal, A. J., J.E. O'Dwyer, V. Friesen, E.J. Woehler and C.P. Burridge. 2020. Identifying mechanisms of genetic differentiation among populations in vagile species: historical factors dominate genetic differentiation in seabirds. Biological Reviews 95(3): 625-651.

Mendoza-Maya, E., J. Espino-Espino, C.Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J.J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. Revista Fitotecnia Mexicana 38(3): 235-247.

Mendoza-Maya, E. y C. Wehenkel. 2021. Reporte tres del proyecto de Proyecto 2017-4-292615 "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática". CONAFOR-CONACYT.

Newton, A.C., T.R. Allnutt, A.C.M. Gillies, A.J. Lowe and R.A. Ennos. 1999. Molecular phylogeography, intraspecific variation and the conservation of tree species. TREE 14(4): 140-145.

Pavy, N., F. Gagnon, P. Rigault, S. Blais, A. Deschênes, B. Boyle, B. Pelgas, M. Deslauriers, S.J. Beaulieu, N. Isabel, J. Mackay and J. Bousquet. 2013. Development of high-density SNP genotyping arrays for white spruce (*Picea glauca*) and transferability to subtropical and nordic congeners. Molecular Ecology Resources 13(2): 324-36. doi: 10.1111/1755-0998.12062

Pritchard, D.J. and S.R. Harrop. 2010. Une reevaluation du rôle de la conservation ex situ face au changement climatique. BGjournal 7(1): 4-8.

Quiñones Pérez, C.Z., C. Sáenz-Romero and C. Wehenkel. 2014a. Genetic diversity and conservation of *Picea chihuahana* Martinez: a review. African Journal of Biotechnology 13: 2786-2795.

Quiñones-Pérez, C.Z., S.L. Simental-Rodríguez, C. Sáenz-Romero, J.P. Jaramillo-Correa and C. Wehenkel. 2014b. Spatial genetic structure in the very rare and species-rich *Picea chihuahuana* tree community (Mexico). Silvae Genetica 63: 149-159.

Quiñones-Pérez, C.Z., M.S. González-Elizondo, C. Wehenkel. 2017. Ruling out genetic erosion in *Picea chihuahuana* Martínez. New Forests 48(2): 201-215. DOI: 10.1007/s11056-017-9581-9

Rivers, M., Shaw, K., E. Beech and M. Jones. 2015. Conserving the World's Most Threatened Trees: A global survey of ex situ collections. BGCI. Richmond, UK. 83 p.

Ronce, O. 2007. How does it feel to be like a rolling stone? Ten questions about dispersal evolution. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 38: 231–253.

Rushforth, K. 1986. Mexico's spruces - rare members of an important genus. Kew Magazine 3(3): 119-124.

Shaw, K. and A. Hird. 2014. Global Survey of *Ex situ* Conifer Collections. BGCI. Richmond. UK. 48 p.

Taylor, R.J. and T.F. Patterson. 1980. Biosystematics of Mexican spruce species and populations. Taxon 29(4): 421-469. DOI: 10.2307/1220630

Wehenkel, C. and C. Sáenz-Romero. 2012. Estimating genetic erosion using the example of *Picea chihuahuana* Martínez. Tree Genetics & Genomes 8(5): 1085-1094, https://doi.org/10.1007/s11295-012-0488-5

Wehenkel, C., C. Sáenz-Romero and J.P. Jaramillo-Correa. 2015. Estimating genetic erosion in threatened conifers: the example of *Picea chihuahuana* Martínez. In: Ahuja, M.R., S.M. Jain, eds. Genetic erosion and biodiversity. The Netherlands: Springer SBM.

CAPÍTULO 4

INDICADORES REPRODUCTIVOS DE *Picea martinezii* T.F. PATT. Y *Picea mexicana* Martínez

Eduardo Mendoza Maya[1], Celestino Flores López[2], Christian Wehenkel[1*], Guadalupe Estefanía Rivas Del Bosque[2], J. Jesús Vargas Hernández[3]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango
[2] Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Coahuila, México
[3] Colegio de Posgraduados, Montecillos, Estado de México, México
*Autor de correspondencia: Christian Wehenkel, wehenkel@ujed.mx

INTRODUCCIÓN

El género *Picea* comprende tres especies en México: *Picea chihuahuana* Martínez, *Picea martinezii* T.F. Patt. y *Picea mexicana* Martínez; estas especies tienen diferente distribución y se ubican en poblaciones aisladas (Ledig *et al.,* 2000a). *Picea chihuahuana* se distribuye en la Sierra Madre Occidental en 40 poblaciones localizadas en los estados de Chihuahua y Durango; *P. martinezii* se distribuye en la Sierra Madre Oriental en cuatro poblaciones conocidas en el estado de Nuevo León; y *P. mexicana* tanto en la Sierra Madre Occidental como en la Oriental, en tres poblaciones conocidas en los estados de Chihuahua y Coahuila (Ledig *et al.,* 2000a).

Picea martinezii se caracteriza por su afinidad ecológica con elementos de bosque mesófilo de montaña; se desarrolla en elevaciones entre los 2,250 y 2,650 m, asociada con especies de coníferas como *Pinus, Abies* y *Taxus*, así como con *Quercus, Tilia, Ostrya, Cornus, Ilex, Juglans* y *Crataegus* (Patterson, 1988). *Picea mexicana* se encuentra en elevaciones de 3,000 a 3,600 m en hábitat de tipo boreal, en asociación con especies de los géneros *Pinus* (*P. rudis, P. arizonica, P. ayacahuite* y *P. cooperi*), *Abies* (*A. vejarii* y *A. durangensis*), *Pseudotsuga mensiezii*, *Populus tremuloides, Salix paradoxa* y *Sambucus* sp. (Flores-López, 2014).

En general, las poblaciones fragmentadas tienden a sufrir mayores niveles de endogamia, lo cual conlleva a una menor capacidad reproductiva y mayor riesgo de

extinción (Frankham, 1996). Uno de los principales problemas de producción de semillas en poblaciones naturales es la gran cantidad de semillas vanas y abortivas causado por falta de disponibilidad de polen, así como por las condiciones ambientales adversas (Flores-López, 2004; Flores-López *et al.,* 2005).

De estos factores, la limitación de polen ha sido el más estudiado (Vaughton y Ramsey, 1995). En ausencia de polinización cruzada adecuada, tal como sucede en poblaciones pequeñas o árboles aislados, se producen grandes cantidades de semillas vanas y las semillas desarrolladas pueden producir plántulas anormales como resultado de la depresión por endogamia (Sorensen y Miles, 1974; Frankham, 1996; Ledig *et al.,* 1997; Mosseler, 1998 y Ledig *et al.,* 2000b). Es decir, las poblaciones pequeñas y aisladas pueden experimentar auto-polinización dando como resultado reducciones de vigor en el número de semillas por cono y de planta de semillero; esto como resultado de alelos deletéreos existentes en el pool genético de la especie, los cuales aparecen en condición homocigota en la progenie. Por lo tanto, el conocimiento de las características biológicas de la maduración de conos y semillas es importante para el manejo de las poblaciones y la programación de colectas.

Uno de los métodos para evaluar la producción de semillas y la pérdida de estas ha sido el análisis de conos y semillas (Bramlett, 1974). Este tipo de análisis proporciona la información requerida para evaluar la productividad, la cual puede expresarse en términos de potencial (PS) y eficiencia (ES) de semilla. El PS representa el número máximo de semillas que los estróbilos son capaces de producir (definido como dos veces el número de escamas fértiles de un cono); la ES es la cantidad de semillas llenas con relación al potencial de semillas. Por lo tanto, la eficiencia de las semillas mide la productividad de un cono en relación con su capacidad biológica (Bramlett *et al.,* 1977).

Los análisis de conos y semillas evalúan además características designadas como indicadores reproductivos, tales como largo del cono, peso seco del cono, escamas fértiles, proporción de óvulos abortados y óvulos rudimentarios, proporción de semillas vanas y semillas llenas, índice de endogamia y eficiencia reproductiva (Bramlett *et al.,* 1977; Mosseler *et al.,* 2000; Flores-López *et al.,* 2005). Estos análisis son considerados como una herramienta básica en el monitoreo de la viabilidad reproductiva y la endogamia de las poblaciones, especialmente las pequeñas y aisladas (Bramlett *et al.,* 1977; Flores-López *et al.,* 2005; Flores-López *et al.,* 2012). Además, estos análisis permiten relacionar los parámetros reproductivos con parámetros de diversidad y estructura genética de las poblaciones.

Los estudios enfocados en el análisis de conos y semillas en coníferas son cuantiosos. Entre las especies más estudiadas se encuentran *Pinus greggii* Engelm. (Ramírez-García *et al.,* 2007), *Pinus oaxacana* Mirov. (Alba-Landa y Márquez Ramírez 2006), *Pinus cembroides* Zucc. (González-Ávalos *et al.,* 2006), *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Hernández-Carmona *et al*., 2003) y *Pinus hartwegii* Lindl. (Alba-Landa *et al*., 2003) que son especies de amplia distribución con poblaciones grandes. Sin embargo, son pocos los trabajos que se concentran en especies en riesgo o pequeñas poblaciones, tal es el caso de *Pinus maximartinezii* Rzedowski, *Pinus catarinae* M.F. Robert-Passini., *Pinus johannis* M.-F. Robert., *Pinus nelsonii* Shaw. y *Pinus pinceana* Gordon; siendo sus pobla-

ciones las que ocupan mayor importancia para la conservación, ya que su fuente de semilla está adaptada a condiciones particulares, por lo que estas semillas pueden ser de gran utilidad en la adaptación de dichas especies ante el cambio climático (Rajora y Mosseler, 2001).

Respecto al género *Picea* en México, Flores-López *et al.,* (2005) encontraron una variación significativa de las características reproductivas tanto entre poblaciones como entre árboles en *Picea mexicana* en dos años de recolecta. De la misma manera estimaron altos índices de endogamia (73%), baja eficiencia de semillas (13%) y una alta proporción de óvulos abortados en sus poblaciones. En cuanto a *Picea martinezii*, Flores-López *et al.,* (2012) encontraron un potencial de semillas alto (266 por cono) pero una baja eficiencia de semilla en las poblaciones (7%). Así mismo se estimó gran pérdida de semilla por óvulos abortados y rudimentarios y semillas vanas, confirmando la presencia de endogamia asociada a autofecundaciones y cruzamientos entre individuos relacionados genéticamente.

Estudios de diversidad genética en *P. mexicana* y *P. martinezii* demostraron que ambas especies presentan diferentes grados de endogamia, cuyo monitoreo (y manejo) a través de los indicadores reproductivos es crítico para su conservación, ya que esta afecta la regeneración (Ledig *et al.,* 2000b; Ledig *et al.,* 2002).

El presente estudio tuvo como objetivo estimar los siguientes indicadores reproductivos en las poblaciones conocidas de *P. martinezii* y *P. mexicana*, para el año de 2018: a) potencial de semillas, b) eficiencia de semillas, c) peso seco del cono, d) número de semillas llenas por cono, e) proporción de semillas llenas, f) proporción de semillas vanas, g) proporción de óvulos abortados, h) proporción de óvulos rudimentarios, i) proporción de semillas dañadas por insectos, hongos o bacterias, j) eficiencia reproductiva, k) índice de endogamia, l) germinación de las semillas, m) longitud del cono, y n) diámetro del cono; esto como una acción de monitoreo de la viabilidad reproductiva de estas especies en peligro de extinción, tomando como referencia los estudios previos para *P. martinezii* (año de colecta 2006; Flores-López *et al.,* 2012) y *P. mexicana* (años de colecta 1999 y 2001; Flores-López *et al.,* 2005).

Materiales y Métodos

Las especies se distribuyen en la Sierra Madre Occidental (SMOc) y la Sierra Madre Oriental (SMOr): las poblaciones de El Butano, Agua de Alardín, Agua Fría y La Encantada de *P. martinezii* se localizan en el estado de Nuevo León (SMOr); las poblaciones de El Mohinora, La Marta y El Coahuilón de *P. mexicana* se localizan en los estados de Chihuahua (SMOc) y Coahuila (SMOr) (Fig. 4.1, Cuadro 4.1) (Ledig *et al.,* 2000a; Flores-López *et al.,* 2012; Mendoza-Maya *et al.,* 2015).

Durante los meses de octubre a noviembre de 2018 se recolectaron conos de 13 a 30 árboles en cada población (184 muestras en total; Cuadro 4.1). El muestreo de los árboles se realizó de manera selectiva a lo largo y ancho de las poblaciones, con una distancia mínima de 50 m entre árboles, para reducir la probabilidad de parentesco. Sin embargo, algunos árboles tuvieron distancias < 50 m, pero ≥ 10 m entre sí, por la

falta de conos en árboles ubicados a 50 m. Los árboles seleccionados cumplieron con las siguientes características fenotípicas: árboles totalmente rectos, dominantes y/o codominantes, con diámetros normales mayores de 10 cm (en algunos casos de 7 cm de DAP) y con presencia de conos. La recolecta de los conos se realizó utilizando equipo de escalado y gancho corta conos en diferentes partes de la copa del árbol (alta, media y baja); seleccionando 30 a 70 conos maduros, cerrados y en buen estado. Los árboles seleccionados se georreferenciaron y se registró su altura y DAP.

En campo, los conos recolectados se colocaron en bolsas recipientes que permitieran una aireación adecuada y se identificaron con la fecha de recolecta, la procedencia y el número de árbol. En laboratorio, muestras de 5 a 10 conos (del total de conos recolectados) por árbol se separaron individualmente en bolsas de papel, y se identificaron con la procedencia, el número de árbol y el número de cono.

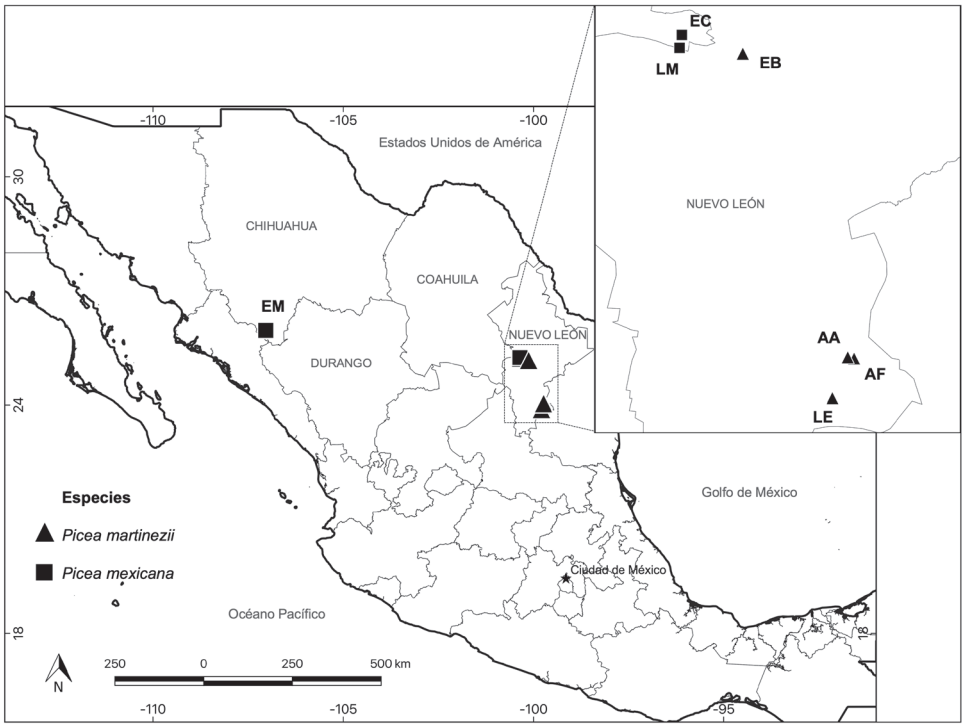


Figura 4.1 Mapa de las poblaciones conocidas de *Picea mexicana* (cuadros) y *Picea martinezii* (triángulos) en México. Nota: EM = El Mohinora, EC = El Coahuilón, LM = La Marta, EB = El Butano, AA = Agua de Alardín, AF = Agua Fría, LE = La Encantada.

Cuadro 4.1 Localización de las poblaciones de *Picea mexicana, Picea martinezii* y árboles recolectados por población.

Población	Propiedad	Municipio	Coordenadas geográficas	Elevación (msnm)*	No. árboles recolectados
			Picea mexicana		
La Marta	Propiedad privada Felipe de la Peña	Arteaga, Coah.	25° 11' 55" N 100° 21' 52" O	3 494	30
El Coahuilón	Ejido Nuncio	Arteaga, Coah.	25° 14' 51" N 100° 21' 17" O	3 528	30
El Mohinora	Ejido El Tule y Portugal	Guadalupe y Calvo, Chih.	25° 57' 41" N 107° 02' 32" O	3 113	30
			Picea martinezii		
Agua Fría	Propiedad Privada: Agua Fría	Aramberri, NL	24° 02' 17" N 99° 42' 39" O	1 820	21
Agua de Alardín	Propiedad Privada: Agua de Alardín	Aramberri, NL	24° 02' 34" N 99° 44' 04" O	2 120	30
El Butano	Ejido La Trinidad	Montemorelos, NL	25° 10 '41" N 100° 07' 37" O	2 180	30
La Encantada	Ejido La Encan-tada	Zaragoza, NL	23° 53' 24" N 99° 47' 30" O	2 515	13
Total					184

* Metros sobre el nivel del mar.

Procedimiento de análisis de los conos

Los indicadores reproductivos se estimaron a través del procedimiento de análisis de conos y semillas de acuerdo con la metodología de Bramlett *et al.,* (1977) y Flores-López *et al.,* (2005).

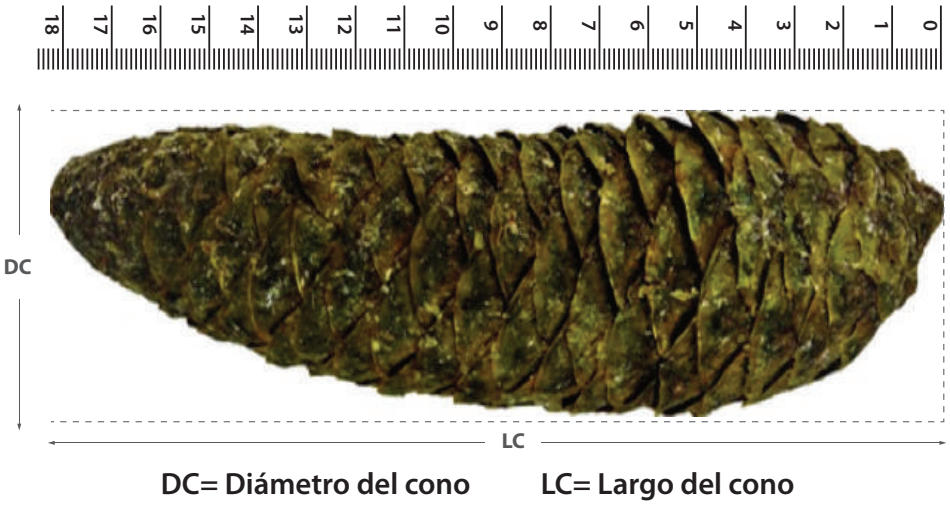


Figura 4.2 Variables evaluadas de los conos de *Picea martinezii* T.F. Patt. y *Picea mexicana* Martínez.

El procedimiento de análisis de los conos fue el siguiente:

1. Con un vernier digital (aproximación de 0.1 mm) se midió el largo (desde la base hasta el ápice) y diámetro (parte más amplia) del cono cerrado (Fig. 4.2).

2. Se procedió al secado de los conos en estufa con flujo de aire durante 24 a 72 h a 45 ºC, hasta obtener una apertura completa de las escamas.

3. Se extrajeron las semillas del cono de manera manual.

4. Se separaron las escamas del cono de forma sistemática, iniciando desde las escamas basales hacia las terminales. Se determinó el número de escamas fértiles e infértiles, de acuerdo con la metodología de Bramlett *et al.,* (1977). Las escamas fértiles se clasificaron en seis categorías con base en el tipo de semillas contenidas (semillas desarrolladas = SD, óvulos abortados = OA, y óvulos rudimentarios = OR) en combinaciones de dos: escamas fértiles con 2SD, 2OA, 2OR, 1SD-1OA, 1SD-1OR, 1OA-1OR (Figura 4.3).

5. Las escamas se identificaron y guardaron, junto con todas las estructuras remanentes del cono, para su posterior secado en estufa a 105 ºC durante 24 h y la lectura del peso seco del cono en balanza electrónica (precisión de 0.01 g).

6. Las semillas extraídas de cada cono, en el paso tres, se separaron en desarrolladas y óvulos abortados o rudimentarios. Las semillas desarrolladas fueron beneficiadas y evaluadas para identificar y registrar las dañadas con ayuda de un estereomicroscopio. Posteriormente, se separaron las semillas desarrolladas en vanas y llenas mediante la técnica de flotado en alcohol 70% (v/v). Las semillas desarrolladas llenas se pesaron y almacenaron a 4 ºC previa identificación.

Con base en los análisis de conos y semillas se evaluaron las siguientes variables: longitud del cono (LC), diámetro del cono (DC), peso seco del cono (PSC), escamas fértiles (EF), escamas infértiles (EI), clasificación de escamas fértiles (paso No. 4 del procedimiento de análisis y Fig. 4.2), total de escamas (TE), óvulos abortados (OA), óvulos rudimentarios (OR), semillas desarrolladas (SD), semillas vanas (SV), semillas llenas (SLL), semillas dañadas por insectos, hongos o bacterias (SDIHB) y peso de las semillas llenas (PesoSLL). A partir de estas variables, se calcularon los valores de los indicadores reproductivos.

Indicadores reproductivos

Con las variables derivadas del análisis de conos y semillas, se estimaron los parámetros reproductivos mediante las siguientes fórmulas:

1. Potencial de semilla (PS) = 2 x total de escamas fértiles.
   Donde el total de escamas fértiles = 2SD + 2OA + 2OR + 1SD1OA + 1SD1OR + 1OA1OR (paso No. 4 del procedimiento de análisis de los conos y Fig. 4.3).

2. Eficiencia de semilla (ES) = total de semillas llenas / potencial de semillas.

3. Peso seco del cono.

4. Número de semillas llenas.

5. Proporción de semillas llenas = semillas llenas (SLL) / semillas desarrolladas (SD) x 100.

6. Proporción de semillas vanas = total de semillas vanas (SV) / semillas desarrolladas (SD) x 100.

7. Proporción de óvulos abortados = óvulos abortados (OA) / potencial de semillas (PS) x 100.
   Donde OA = EI1S1OA + EIOA1OR + [EI2OA x 2]. (Paso No. 4 del procedimiento de análisis de los conos y Fig. 4.3).

8. Proporción de óvulos rudimentarios = óvulos rudimentarios (OR) / potencial de semillas (PS) x 100.
   Donde OR = EI1S1OR + EI1OA1OR + [EI2OR x 2]. (Paso No. 4 del procedimiento de análisis de los conos y Fig. 4.3).

9. Proporción de semillas dañadas = [total de semillas dañada por insectos, hongos o bacterias (SDIHB) / Semillas desarrolladas (SD)] x 100.

10. Eficiencia reproductiva (ER) = peso de las semillas llenas / peso seco del cono (PSC).

11. Índice de endogamia (IE) = semillas vanas (SV) / total de semillas desarrolladas (TSD). Donde TSD = semillas llenas (SLL) + semillas vanas (SV) + semillas dañadas por insectos, hongos o bacterias (SDIHB).

12. Porcentaje de germinación calculado a partir de 31 semillas por árbol por población.

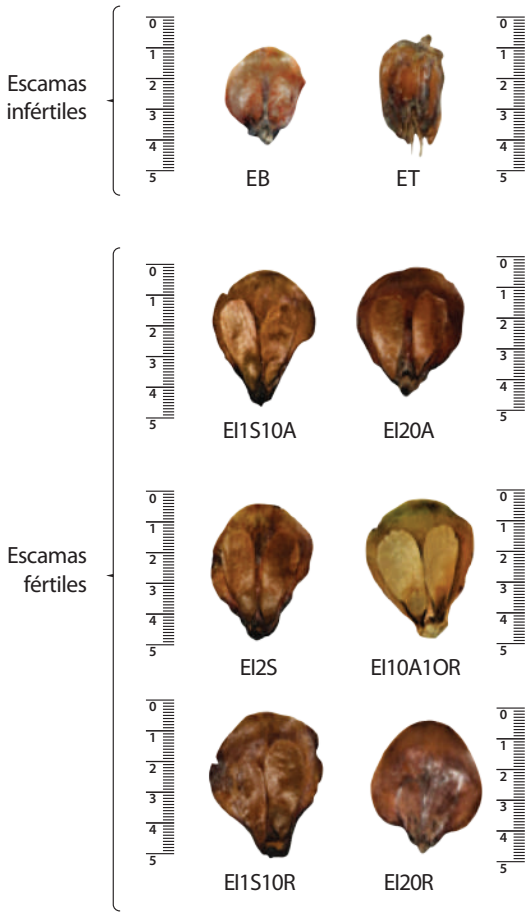


Figura 4.3. Características morfológicas de las escamas evaluadas para la estimación de indicadores reproductivos en *Picea martinezii* y *Picea mexicana*. (EB = Escama basal con óvulos rudimentarios, ET = Escama terminal con óvulos rudimentarios, 1SD-1OA = Escama con una semilla desarrollada y un óvulo abortado, E2OA = Escama con dos óvulos abortados, E2S = Escama con dos semillas desarrolladas, E1OA-1OR = Escama con un óvulo abortado y un óvulo rudimentario, E1S-1OR = Escama con una semilla desarrollada y un óvulo rudimentario, E2OR = Escama con dos óvulos rudimentarios).

Análisis estadísticos

Se realizaron pruebas de normalidad para los datos de los diferentes indicadores reproductivos. Con base en estos análisis, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis (para datos no paramétricos) y pruebas de Dunn (utilizando la corrección de Bonferroni, partiendo de $\alpha = 0.05$) para detectar diferencias en la germinación de semillas entre poblaciones y especies. Finalmente, se estimó el coeficiente de correlación de Spearman (r_s) (Hauke y Kossowski, 2011) entre variables reproductivas, como una aproximación para reducir el grupo de variables en futuras evaluaciones. Todos los análisis se realizaron con el software libre R (R Core Team, 2015).

RESULTADOS

Picea martinezii

El potencial de semillas promedio para *P. martinezii* es de 280 semillas por cono, con un rango de 259 a 292 (Figura 4.4), donde el primer valor corresponde a la población Agua Fría que se diferencia del resto. Sin embargo, la especie presenta altas pérdidas de semillas (Figura 4.4), por lo tanto, baja eficiencia de semillas (ES = 16.0 %) y eficiencia reproductiva (ER = 0.31), así como un elevado índice de endogamia (IE = 0.68) (Cuadro 4.2).

Entre las causas o factores que explican la pérdida de semilla sobresalen el porcentaje de óvulos abortados y de semillas vanas, mientras que los óvulos rudimentarios y las semillas dañadas representan una causa casi nula en la pérdida de semillas de esta especie (Cuadro 4.2).

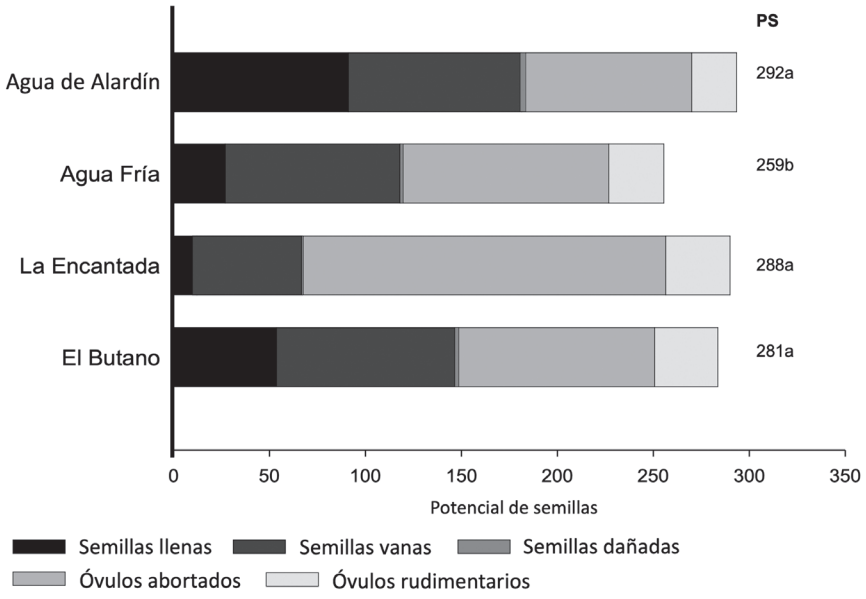


Figura 4.4 Potencial de semillas (PS) de cuatro poblaciones de *Picea martinezii* en México. Las medias seguidas de letras iguales no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 4.2 Indicadores reproductivos de conos y semillas de *Picea martinezii* en el año de colecta 2018.

Indicadores reproductivos	Promedio
Peso seco del cono (gr)	32.56
Número de semillas llenas por cono	45.71
Proporción de semillas llenas	31.14
Proporción de semillas vanas	67.95
Proporción de óvulos abortados	44.79
Proporción de óvulos rudimentarios	8.39
Proporción de semillas dañadas por insectos, hongos o bacterias	0.91
Eficiencia reproductiva [1] (mg/g)	31.0
Índice de endogamia [2]	0.68
Longitud del cono (cm)	13.64
Diámetro del cono (cm)	3.44

Nota: [1] Peso de semilla llena en mg / Peso seco del cono en g. [2] Semillas vanas / Semillas desarrolladas.

Con respecto al análisis de correlación entre los principales indicadores reproductivos de *P. martinezii*, se detectaron correlaciones significativas entre la eficiencia de semillas (ES) y la proporción de semillas llenas (PSLL) con el índice de endogamia (IE) y con la eficiencia reproductiva (ER) (Cuadro 4.3 y Fig. 4.5).

Cuadro 4.3 Coeficientes de correlación de Spearman entre los principales indicadores reproductivos en las poblaciones de *Picea martinezii* T.F. Patt. y *Picea mexicana* Martínez, en el año de colecta 2018.

	Picea martinezii					*Picea mexicana*				
	LC	**PSC**	**PSLL**	**CE**	**ER**	**LC**	**PSC**	**PSLL**	**CE**	**ER**
ES	0.37**	0.42**	0.86**	-0.86**	0.97**	0.24**	0.04	0.89**	-0.86**	0.90**
LC		0.83**	0.25**	-0.25**	0.29**		0.47**	0.18**	-0.17**	0.34**
PSC			0.32**	-0.32**	0.31**			-0.02**	0.03	-0.01
PSLL				-0.99**	0.85**				-0.98**	0.81**
CE					-0.85**					-0.78**

Nota: ES= Eficiencia de semillas, LC = Longitud del cono, PSC = Peso seco del cono, PSLL = Proporción de semillas llenas, CE = Coeficiente de endogamia y ER = Eficiencia reproductiva.

** Valores con significancia ($p<0.0001$).

Finalmente, se determinó un porcentaje de germinación de semillas promedio de 72.9 % para *P. martinezii*, con diferencias significativas de germinación entre poblaciones; El Butano y Agua de Alardín con el mayor porcentaje de germinación, y Agua Fría con el menor (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Porcentaje de germinación de semillas de *Picea martinezii* y *Picea mexicana*. Las medias en una misma fila seguidas de letras iguales no son estadísticamente diferentes (α = 0.05).

Germinación[1]	***Picea martinezii***				***Picea mexicana***		
	EB	AA	AF	LE	EM	LM	EC
Promedio población	78.49a	79.46a	61.29b	72.46ab	80.14a	74.41a	80.86[a]
Promedio especie	72.93a				78.47a		

Nota: [1] Promedio de germinación estimado a partir de 31 semillas por árbol. EB = El Butano, AA = Agua de Alardín, AF = Agua Fría, LE = La Encantada, EM = El Mohinora, LM = La Marta, EC = El Coahuilón.

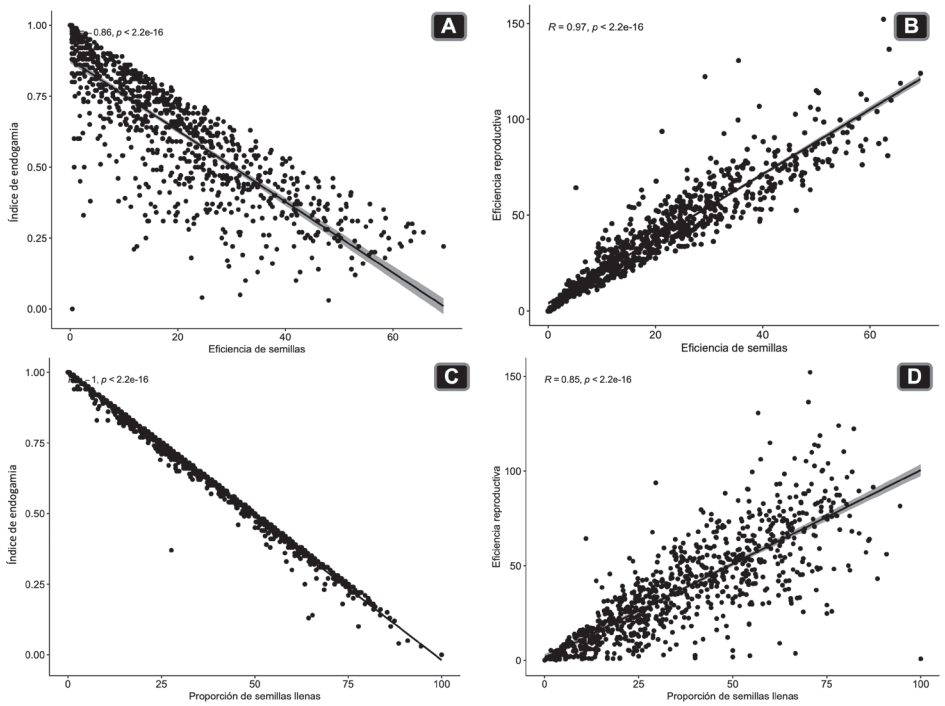


Figura 4.5 Coeficiente de correlación de Spearman entre la eficiencia de semillas con el índice de endogamia (A) y la eficiencia reproductiva (B); y entre la proporción de semillas llenas con el índice de endogamia (C) y la eficiencia reproductiva (D) en *Picea martinezii*.

Picea mexicana

El potencial de semillas promedio para *P. mexicana* es de 147 semillas por cono, con un rango de 142 a 150, sin encontrarse diferencias significativas entre poblaciones (Fig. 4.6). Esta especie también presenta altas proporciones de óvulos abortados, óvulos rudimentarios y semillas vanas (Fig. 4.6), baja eficiencia de semillas (ES = 28%) y eficiencia reproductiva (ER = 24.0), así como un elevado índice de endogamia (IE = 0.55) (Cuadro 4.5).

Al igual que en *P. martinezii*, entre las causas o factores que explican la pérdida de semilla en *P. mexicana* sobresalen los porcentajes de semillas vanas y de óvulos abortados, y en menor medida por los óvulos rudimentarios, mientras que las semillas dañadas representan una causa muy reducida en la pérdida de semillas en las poblaciones (Fig. 4.6).

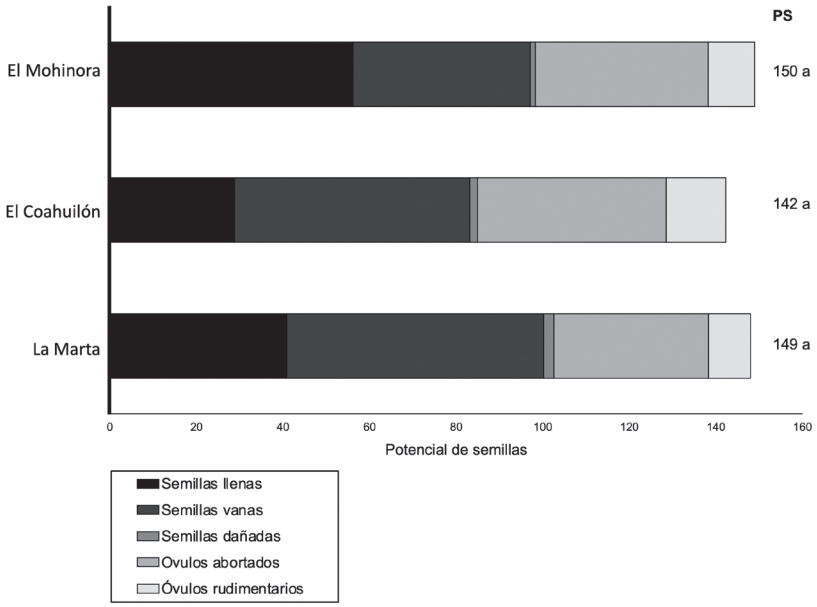


Figura 4.6 Potencial de semillas (PS) de las tres poblaciones de *Picea mexicana* en México. Las medias seguidas de letras iguales no son estadísticamente diferentes (α = 0.05).

Cuadro 4.5 Indicadores reproductivos de conos y semillas de *Picea mexicana* en el año de colecta 2018.

Indicadores reproductivos	Promedio
Peso seco del cono (gr)	9.25
Número de semillas llenas por cono	41.89
Proporción de semillas llenas	43.07
Proporción de semillas vanas	54.81
Proporción de óvulos abortados	27.19
Proporción de óvulos rudimentarios	8.27
Proporción de semillas dañadas por insectos, hongos o bacterias	2.11
Eficiencia reproductiva (mg/g) [1]	24.0
Índice de endogamia [2]	0.55
Longitud del cono (cm)	5.35
Diámetro del cono (cm)	2.38

Nota: [1] Peso de semilla llena en mg / Peso seco del cono en g. [2] Semillas vanas / Semillas desarrolladas.

Con respecto al análisis de asociación entre los principales indicadores reproductivos de *P. mexicana*, se detectaron correlaciones significativas entre la eficiencia de semillas (ES) y la proporción de semillas llenas (PSLL) con el índice de endogamia (IE) y con la eficiencia reproductiva (ER) (Cuadro 4.3 y Fig. 4.7).

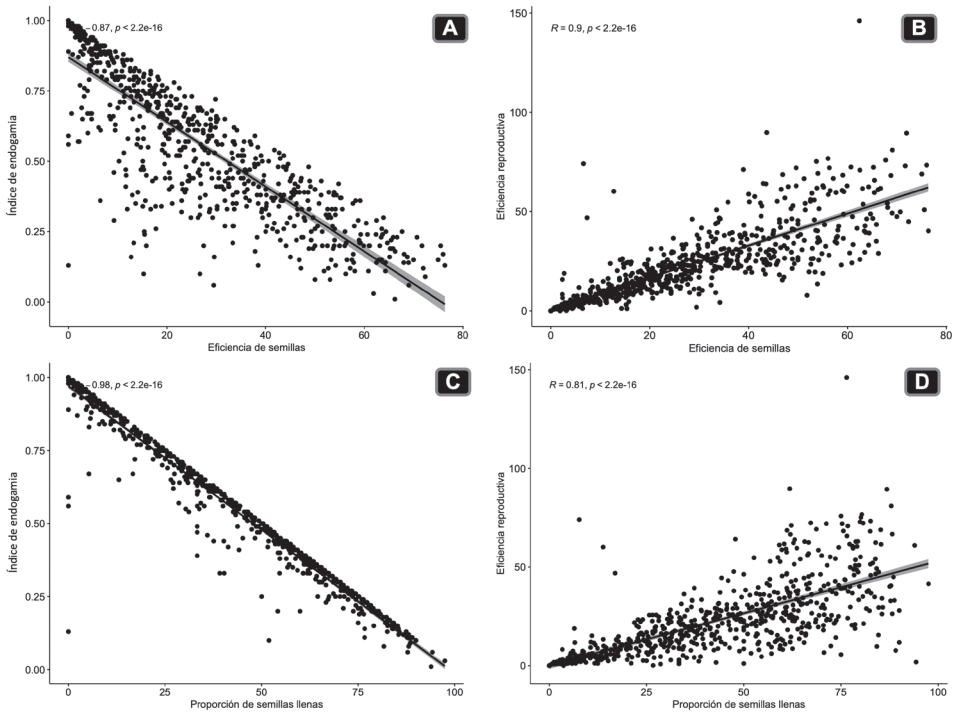


Figura 4.7 Coeficientes de correlación de Pearson entre la eficiencia de semillas y el índice de endogamia (A) y la eficiencia reproductiva (B); y entre la proporción de semillas llenas y el índice de endogamia (C) y la eficiencia reproductiva (D) en *Picea mexicana* Martínez.

En *P. mexicana* se estimó un valor promedio de germinación de semillas de 78.5 %, sin diferencias significativas de germinación entre poblaciones (Cuadro 4.4). No se detectaron diferencias significativas en los porcentajes de germinación entre especies (Cuadro 4.4).

Discusión

Los resultados muestran que el potencial de semillas promedio para *Picea martinezii* (PS = 280) es de los más altos en comparación con otras coníferas como *Pinus patula* (PS = 82, Alba-Landa, 1999), *P. tecunumanii* (PS = 125, Isaza *et al.,* 2002), *P. oocarpa* (PS = 137, Isaza *et al.,* 2002), *P. maximinoi* (PS = 140, Isaza *et al.,* 2002), *Pinus greggii* (161, Alba-Landa *et al.,* 2005), *P. oaxacana* (PS = 186, Vázquez *et al.,* 2004), *P. hartwegii* (PS = 199, Alba-Landa *et al.,* 2005). El potencial de semilla que se reporta aquí para *Picea martinezii* es mayor incluso al encontrado por Flores-López *et al.,* (2012) (PS = 266). Una variación similar en diferentes temporadas de producción se reporta para *Pinus cooperi* (PS = 103 y 115, Prieto y Martínez, 1993).

En cuanto a la eficiencia de semillas, *P. martinezii* (ES = 19) presenta los porcentajes más bajos en comparación con otras coníferas como *Pinus gregii* (ES = 78.9, Alba-Landa *et al.,* 2005), *P. hartwegii* (ES = 71.5, Alba-Landa *et al.,* 2005), *Pinus cooperi* (ES =

68.8, Prieto y Martínez, 1993), *P. patula* (ES = 64.6, Alba-Landa, 1999), aunque similar al encontrado para especies como *Pseudotsuga mensiezii* (ES = 24.5, Zavala y Méndez, 1996), *Pinus tecunumanii* (ES = 8.0, Isaza *et al.,* 2002) o *P. maximinoi* (ES = 8.0, Isaza *et al.,* 2002).

El índice de endogamia promedio de *Picea martinezii* calculado en este estudio (IE = 0.68) fue menor al reportado por Flores-López *et al.,* (2012) para esta misma especie (IE = 0.75). No se cuenta con un valor de referencia para la eficiencia reproductiva (ER) para *P. martinezii*, sin embargo, el valor calculado es mayor que para *Picea rubens* que tiene una distribución más amplia, pero con poblaciones aisladas (Mosseler *et al.,* 2000).

Por otra parte, el potencial de semillas de *P. mexicana* (PS = 147) se ubica dentro del rango encontrado para otras pináceas como *P. oocarpa* (Isaza *et al.,* 2002) o *P. maximinoi* (Isaza *et al.,* 2002). La eficiencia de semillas (ES = 28) es menor que para especies de pinos como *Pinus gregii* (Alba-Landa *et al.,* 2005), *P. hartwegii* (Alba-Landa *et al.,* 2005), *Pinus cooperi* (Prieto y Martínez, 1993) y *P. patula* (Alba-Landa, 1999), pero similar a especies como *Pseudotsuga mensiezii* (Zavala y Méndez, 1996), *Pinus tecunumanii* (Isaza *et al.,* 2002) o *P. maximinoi* (Isaza *et al.,* 2002). El índice de endogamia (IE = 0.55) es menor al reportado por Flores-López *et al.,* (2005) (IE = 0.79). La eficiencia reproductiva de *P. mexicana* se ha mantenido estable en un lapso de 20 años ($ER_{1999\text{-}2001}$ = 0.24 *vs* ER_{2018} = 0.24), valor que es mayor al encontrado para *Picea rubens* (Mosseler *et al.,* 2000).

En general, las diferencias entre los diferentes indicadores reproductivos reportados aquí con los evaluados previamente para ambas especies pueden deberse al recambio de los individuos participantes en cada evento reproductivo (población efectiva). Sin embargo, el incremento en la eficiencia de semillas y la reducción de los índices de endogamia en ambas especies indican un posible incremento en el tamaño efectivo de población en ellas, mediante la integración de árboles jóvenes a la edad reproductiva; lo cual es posible en el lapso de 12 y 20 años transcurridos desde la última evaluación en *P. martinezii* y en *P. mexicana*, respectivamente. Estas hipótesis podrían evaluarse con estudios fenológicos y demográficos más extensos.

Por otra parte, ambas especies presentaron alto porcentaje de germinación de semillas (Cuadro 4.4), similar al de otras coníferas de amplia distribución, como *Pinus patula* Sch. et Cham. (75-84 %) y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (70-81%) (Aparicio-Rentería *et al.*, 1999). Aunque la pérdida de semillas en forma de semillas vanas, óvulos abortados y óvulos rudimentarios es muy alta en ambas especies, las pocas semillas desarrolladas llenas tienen elevada viabilidad. Por lo tanto, un factor crítico es determinar las causas intrínsecas o extrínsecas implicadas en esta elevada pérdida de semillas.

Las causas que impiden que una semilla no culmine su proceso de crecimiento y desarrollo pueden ser factores endógenos adversos (Varnell, 1976; Prieto y Martínez, 1993). De acuerdo con Karrfalt y Belcher (1977), la baja eficiencia de semilla se debe generalmente a tres causas: escasa polinización, autopolinización y daños por insec-

tos. Esto se observa en los resultados registrados en varias especies de *Picea* (Caron y Powell, 1989). Adicionalmente, Frankham (1996) incluye el reducido tamaño poblacional entre los factores que pueden tener efectos directos en la viabilidad reproductiva, al reducirse la diversidad genética e incrementarse la frecuencia de alelos deletéreos mediante endogamia o deriva génica. La comparación a nivel de especie entre los indicadores de *P. martinezii* y *P. mexicana* con otras pináceas sugiere que ambas especies aún se encuentran dentro del rango normal en cuanto a capacidad reproductiva. Sin embargo, a nivel poblacional el estatus podría ser diferente, por lo que es necesario evaluar el efecto del tamaño poblacional y la diversidad genética sobre este importante indicador reproductivo.

Los métodos de manejo para contrarrestar la pérdida de semillas podrían ser el incremento de la diversidad genética dentro de las poblaciones mediante la polinización controlada (Mendoza-Maya *et al.,* 2015), el incremento del tamaño de población mediante reforestaciones con individuos seleccionados que posean la mayor eficiencia reproductiva y el menor índice de endogamia determinados mediante análisis de conos, en diferentes eventos reproductivos. La selección de los árboles semilleros podría apoyarse también con marcadores moleculares que permitan identificar alelos deletéreos y su efecto en la viabilidad reproductiva, y de esta manera seleccionar a los individuos con la menor cárga de alelos deletéreos y más adecuación. Acciones de manejo adicionales son la identificación y saneamiento de plagas y enfermedades, lo cual se puede realizar mediante sitios permanentes de monitoreo. Todo esto puede permitir, en el mediano y largo plazo, la conservación de estas especies *in situ*. Sin embargo, es importante considerar los escenarios climáticos futuros (Ledig *et al.,* 2010), que indican que la conservación *ex situ* será necesaria.

La evaluación de los indicadores reproductivos es una herramienta esencial para el monitoreo de la viabilidad de las poblaciones (Bramlett *et al.,* 1977, Mosseler *et al.,* 2000), al evaluar caracteres implicados directamente en la adecuación de las especies a los sitios que habita. Sin embargo, es una metodología laboriosa que implica una inversión considerable de tiempo, el cual muchas veces es limitado. De acuerdo con los resultados de las asociaciones entre los principales indicadores reproductivos (Figs. 4.5 y 4.7), es razonable suponer que la evaluación de la proporción de semillas llenas (PSLL) o la eficiencia de semillas (ES), dentro del grupo completo de indicadores reproductivos, permite una estimación confiable del índice de endogamia y de la eficiencia reproductiva. Esto permitiría reducir en gran medida la carga de trabajo y el tiempo de evaluación.

REFERENCIAS

Alba-Landa, J. 1999. Potencial de producción de semilla de la progenie de un huerto semillero de segunda generación de selección de *Pinus patula* Schl. et Cham. en el estado de Veracruz. ISIMA, Durango, México, pp. 133-134.

Alba-Landa, J., J. Márquez-Ramírez y H. S. Bárcenas. 2005. Potencial de producción de semillas de *Pinus greggi* Engelm. en tres cosechas de una población ubicada en Carrizal Chico, Zacualpan Veracruz, México. Foresta Veracruzana 7(2): 37-40.

Alba-Landa, J., A. Aparicio-Rentería y J. Márquez-Ramírez. 2003. Potencial y eficiencia de producción de semillas de *Pinus hartwegii* Lindl. de dos poblaciones de México. Foresta Veracruzana, 5(1): 25-28.

Alba-Landa., J. y J. Márquez-Ramírez. 2006. Potencial y eficiencia de producción de semillas de *Pinus oaxacana* Mirov. de Los Molinos, Perote, Veracruz. Foresta Veracruzana 8(1): 31-36.

Aparicio-Rentería, A., H. Cruz-Jiménez y J. Alba-Landa. 1999. Efecto de seis sustratos sobre la germinación de *Pinus patula* Sch. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. en condiciones de vivero. Foresta Veracruzana 1(2): 31-34.

Bramlett, D. L. 1974. Seed potential and seed efficiency. *In*: John Kraus (ed.). Seed yield from southern pine seed orchards colloquium proceedings. Ga. For. Res. Counc., Macon, Ga. U. S. A. pp. 1-7.

Bramlett, D. L., E. W. Belcher Jr., G. L. DeBarr, J. L Hertel, R. P. Karrfalt, C. W. Lantz, T. Miller, K. D. Ware y H. O. III Yates. 1977. Cone analysis of Southern pines: a guidebook. Gen. Tech. Rep. SE-13. Asheville, N.C. USDA, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, N.C. U. S. A. 28 pp.

Caron, G. E. y G. R. Powell. 1989. Cone size and seed yield in young *Picea mariana* trees. Canadian Journal Forest Resources 19: 351-358.

Dunn, O. J. 1964. Multiple comparisons using rank sums. Technometrics 6(3): 241-252.

Flores-López, C. 2004. Indicadores reproductivos en tres poblaciones de *Picea mexicana* Martínez de México. Tesis de Maestria en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 46 pp.

Flores-López, C. 2014. Líneas para la conservación de los recursos genéticos de *Picea*

mexicana Martínez y *Picea martinezii* Patterson. Tesis Doctor en Ciencias Forestales. Facultad de Forestal y Agronomía, Centro de Estudios Forestales, Universidad de Pinar Del Río. República de Cuba. 90 pp.

Flores-López C., J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández. 2005. Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez, 1-10 pp.

Flores-López, C., C. G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2012. Reproductive indicators in natural populations of *Picea martinezii* T. F. Patterson. Revista Forestal Baracoa 31(2): 49–58.

Frankham, R. 1996. Relationship of genetic variation to population size in wildlife. Conservation Biology 10 (6): 1500-1508.

González-Ávalos, J., E García-Moya, J. J. Vargas-Hernández, A. Trinidad-Santos, A. Romero-Manzanares y V. M. Cetina-Alcalá. 2006. Evaluación de la producción y análisis de conos y semillas de *Pinus cembroides* Zucc. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 12(2): 133-138.

Hauke, J., and Kossowski, T. 2011. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. Quaest. Geogr., 30: 87–93.

Hernández-Carmona., O., E. O. Ramírez-García y L. Mendizábal-Hernández. 2003. Variación en semillas de cinco procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. Foresta Veracruzana 5(2): 23-28.

Isaza, N., W. S. Dvorak y J. López-Upton. 2002. Producción de semillas del género *Pinus* en huertos y rodales semilleros de Smurfit Cartón de Colombia, Informe de Investigación no. 187, Smurfit Cartón de Colombia, Cali, Colombia, 9 pp.

Karrafalt, R. P. y E. W. Belcher. 1977. Evaluation of seed production by cone analysis. Northeastern Forest Tree Improvement Conference. University of Maryland, Center for Environmental and Estaurine Studies. College Park, Maryland. Georgia. pp. 84-89

Ledig, F. T., V. Jacob C., P. D. Hodgskiss y T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. Evolution 51 (6): 1815-1827.

Ledig, F. T., M. Mápula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López y M. A. Capó-Arteaga. 2000a. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47:71-78.

Ledig, F. T., B. Bermejo-Velázquez, P. D. Hodgskis, D. R. Johnson, C. Flores-López y V. Jacob-Cervantes. 2000b. The mating system and genetic diversity in Martínez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. Canadian Journal of Forest Research 30: 1156-1164.

Ledig, F. T., G. E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero y C. Flóres-López. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. American Journal of Botany 97: 970-987.

Ledig, F. T., P. D. Hodgskiss y V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3:113-122.

Mendoza-Maya, E., J. Espino-Espino, C. Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J. J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de picea en peligro de extinción. Revista Fitotecnia Mexicana 38(3): 235-247.

Mosseler, A. 1998. Miniumm viable population size and the conservation of forest genetic resources. *In*: S. Puri (Ed.). Tree improvement: applied research and technology transfer. Science Publishers, Inc. U.S.A. pp. 191-205.

Mosseler, A., J. E. Major, J. D. Simpson, B. Daigle, K. Lange, Y.-S. Park, K.H. Johnsen, y O.P. Rajora. 2000. Indicators of populations viability in red spruce, *Picea rubens*. I. Reproductive traits and fecundity. Canadian Journal of Botany 78:928-940.

Patterson, T. E. 1988. A new species of *Picea* (Pinaceae) from Nuevo Leon, Mexico. SIDA 13: 131-135.

Prieto R., J. A y J. Martínez A. 1993. Análisis de conos y semillas en dos áreas semilleras de *Pinus cooperi*. Folleto científico Nº 1. SARH, INIFAP, Centro de Investigación Regional del Norte Centro. Campo Experimental "Valle del Guadiana". Durango, Dgo. México. 18 pp.

Rajora, O. P. y A. Mosseler. 2001. Challenges and opportunities for conservation of forest genetic resources. Euphytica 118(2): 197-212.

Ramírez-García., E. O., J. Márquez-Ramírez y O. Hernández-Carmona. 2007. Estudio de conos de *Pinus greggii* Engelm. de una plantación en el municipio de Naolinco, Veracruz, México. Foresta Veracruzana 9(2): 39-44.

R Core Team. 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. Available online: http://www.R-project.org/

Sorensen, F. C. y R. S. Miles. 1974. Self-pollination on Douglas-fir and ponderosa pine seeds and seedlings. Silvae Genetica 23 (5): 135-165.

Varnell, R. J. 1976. Cone and seed production in Flash Pine: effects of tree dimensions and climatic factors. Departament of Agriculture Southeastern Forest Experiment Station Asheville, Nort Carolina, U. S. A. 145: 1-10.

Vaughton, G. y M. Ramsey. 1995. Pollinators and seed production. *In*: seed development and germination. Edited by J. Kigel, G. Galili. New York, USA. pp. 475-489.

Vázquez, O. G., E. O. Ramírez-García y L. Alba-Landa. 2004. Variación de conos y potencial de producción de semillas de *Pinus oaxacana* Mirov. en una población del estado de Tlaxcala, México. Foresta Veracruzana 6(2): 31-36.

Zavala, C. F. y J. T. Méndez M. 1996. Factores que afectan la producción de semillas en *Pseudotsuga macrolepis* Flous en el estado de Hidalgo, México. Acta Botanica Mexicana 36: 1-13.

CAPÍTULO 5

ENSAYO DE PROCEDENCIAS DE LAS PICEAS MEXICANAS EN CONDICIONES DE VIVERO: TRES ESPECIES AMENAZADAS POR LA VARIACIÓN CLIMÁTICA**

José Marcos Torres-Valverde[1], J. Ciro Hernández-Díaz[2*], Artemio Carrillo-Parra[2], Eduardo Mendoza-Maya[3], Christian Wehenkel[2]

[1] Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[3] Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
*Autor de correspondencia: J. Ciro Hernández, jciroh@ujed.mx
**Este trabajo es una traducción del artículo "Provenance Trials of the Mexican Spruces in Nursery Conditions: Three Species Endangered by Climatic Variation" Environm. Sci. Proc. 2021, 3(1), 12, https://doi.org/10.3390/IECF2020-08080

INTRODUCCIÓN

En México, hay tres especies endémicas del género *Picea*, que viven en poblaciones relictuales y están catalogadas como "En peligro" en la Lista Roja de la UICN (2019). *Picea mexicana* Martínez tiene solo tres ubicaciones, por encima de los 3,000 m de altitud (Ledig *et al.,* 2000, 2004), *P. martinezii* T.F. Patt. se encuentra en cuatro poblaciones entre 1,800 y 2,500 m (Flores-López *et al.,* 2012) y *P. chihuahuana* Martínez se ha encontrado en 40 sitios entre 2,311 y 2,700 m (Ledig *et al.,* 2002; Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012). Las distribuciones de las piceas mexicanas están fragmentadas en poblaciones aisladas, lo que podría conducir a diferenciaciones fenológicas, morfológicas y genéticas, en parte causadas por la adaptación local a diferentes tipos de suelos y variables climáticas (Domínguez-Guerrero *et al.,* 2017). Por lo tanto, es importante identificar los principales factores responsables de dicha adaptación, que podrían ser útiles en los programas de migración asistida, como una opción para la conservación *ex situ*. Los ensayos de procedencia-progenie permiten diseñar programas de conservación para el ahorro de recursos genéticos en el mediano y largo plazo. En nuestro experimento (Lámina 8 B), estudiamos los componentes genéticos y ambientales de la

variación fenotípica entre árboles de diferentes procedencias (Zobel y Talbert, 1988). Específicamente, examinamos el efecto que tienen las variables de elevación y climáticas sobre la supervivencia y el crecimiento de plántulas de las procedencias de cada especie de *Picea*, en vivero en condiciones iguales, asumiendo que tal respuesta podría ser un proxy de la adaptación o la diferenciación genética entre poblaciones.

Sección experimental

El estudio se basó en ocho procedencias de las tres piceas mexicanas (Lámina 8 C-D), ubicadas en cuatro estados de México: una procedencia es de Chihuahua, una de Durango, una de Coahuila y cinco de Nuevo León. El peso medio de 100 semillas basado en tres árboles por procedencia se midió con una balanza de peso digital (modelo Velab No. VE-5000H, México). Establecimos nuestro experimento de prueba de procedencias en un vivero en El Salto, municipio de Pueblo Nuevo, Durango, a una altitud de 2,590 m, donde cada plántula se colocó en un recipiente redondo de 165 cm^3 (Lámina 8 F). Allí medimos la supervivencia de 5,641 plántulas y su crecimiento en diámetro (mm) y altura (mm), durante 12 meses (Lámina 8 G-I). Todas estas plántulas crecieron en las mismas condiciones de clima y suelo. Aunado a esto, se modelaron valores de 14 variables bioclimáticas para cada procedencia (Rehfeldt, 2006).

Usamos la prueba de correlación (r_s) de Spearman (Hauke y Kossowski, 2011) para buscar posibles relaciones entre el crecimiento medio (diámetro y altura, mm), el peso de 100 semillas (g) y cada variable climática analizada de cada especie y procedencia. Utilizamos la misma prueba para detectar colinealidad entre variables climáticas. Las diferencias de crecimiento medio entre las tres especies se probaron con la prueba de Tukey y Kramer (Nemenyi), definiendo la distribución de Tukey utilizando el paquete PMCMR del programa estadístico *R* (*R* Core Team, 2015). También aplicamos una corrección de Bonferroni, con un α original = 0.05 y un α^* corregido = 0.003.

RESULTADOS

La prueba de Nemenyi indicó diferencias significativas en la variable compuesta diámetro x altura entre las tres piceas (Cuadro 5.1).

Después de la corrección de Bonferroni, detectamos correlaciones significativas entre el proxy genético de la plántula (altura) y algunas variables climáticas (Figura 5.1 y Cuadro 5.2). No encontramos ninguna correlación significativa después de la corrección de Bonferroni entre el peso medio de 100 semillas y el crecimiento medio de las plántulas ($r_s = 0.78$, $p = 0.027$).

Cuadro 5.1 Crecimiento absoluto y diferencias de crecimiento de plántula en diámetro x altura (mm^2) de *Picea chihuahuana*, *P. mexicana* y *P. martinezii* y sus valores de *p* probados por la prueba de Tukey y Kramer (Nemenyi) con distribución de Tukey.

Especies	Media de crecimiento (diámetro x altura) (mm^2)	Diferencias absolutas en la media de crecimiento entre las especies (mm^2) (valores de *p*)	
		Picea martinezii	*Picea mexicana*
P. chihuahuana	609	792 (2×10^{-16})	324 (2.2×10^{-7})
P. mexicana	933	468 (2×10^{-16})	
P. martinezii	1401		

Cuadro 5.2 Correlaciones de Spearman entre la altura media de las plántulas y las variables climáticas más significativas: Smrp = precipitación de verano (mm), Smrsprpb = balance de precipitación verano / primavera: (jul + ago) / (apr + may), Elev = elevación (m), Mmax = temperatura máxima media en el mes más cálido (grados centígrados) y SW = peso de 100 semillas (g).

	var	$r_s[H \times var]$	***p* value**
Con Pch-QD	Smrp	-0.850	0.0074
	Smrsprpb	-0.826	0.011
	Elev	-0.833	0.015
	SW	0.785	0.027
Sin Pch-QD	Elev	-0.964*	0.0028
	Mmax	0.883	0.008
	Smrp	-0.882	0.008
	Smrsprpb	-0.847	0.016
	SW	0.892	0.012

Nota: * estadísticamente significativo después de la corrección de Bonferroni. Pch-QD = *Picea chihuahuana* - procedencia Quebrada de Durán.

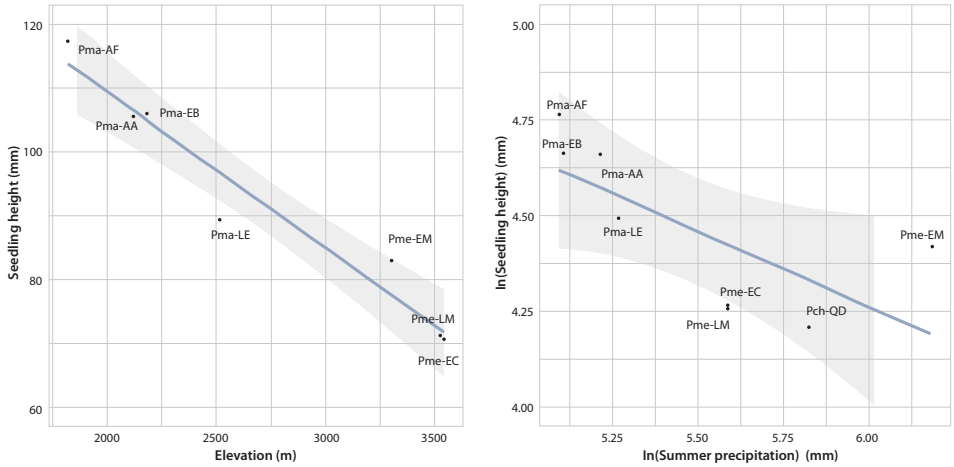


Figura 5.1 Correlaciones de Spearman entre la altura media de las plántulas y las dos variables climáticas más significativas: elevación (m) (sin Pch-QD) y precipitación de verano (jul + ago) (mm) (con Pch-QD); Pch-QD = *Picea chihuahuana* - procedencia Quebrada de Durán, Pma-AF = *P. martinezii* - procedencia Agua Fría, Pma-AA = *P. martinezii* - procedencia Agua de Alardín[5], Pma-EB = *P. martinezii* - procedencia El Butano, Pma-LE = *P. martinezii* - procedencia La Encantada, Pme-EM = *P. mexicana* - procedencia El Mohinora, Pme-LM = *P. mexicana* - procedencia La Marta, Pme-EC = *P. mexicana* - procedencia El Coahuilón.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se encontró que existen diferencias genéticas cuantitativas significativas entre las tres especies de *Picea* analizadas y que las diferencias de procedencia están significativamente correlacionadas con la elevación, apoyando la hipótesis de adaptación a las condiciones locales (Domínguez-Guerrero *et al.*, 2017). Sin embargo, no se puede descartar una proporción de plasticidad fenotípica porque el experimento de prueba de procedencia no se llevó a cabo de forma recíproca. En otro estudio, se informó que la precipitación fue un predictor moderadamente bueno del crecimiento en altura en *Picea mariana* (Parker *et al.*, 1994) mientras que Castellanos-Acuña *et al.*, (2018) encontraron que la temperatura media del mes más frío y un índice de aridez están fuertemente relacionados con la adaptación genética de las especies de árboles. Nuestros hallazgos sobre los diferentes efectos de las variables climáticas en las tres especies de *Picea* en peligro de extinción estudiadas y sus procedencias pueden tener importantes implicaciones prácticas para las estrategias de conservación *ex situ*. Además, los programas de reforestación deberían tener más éxito si las plántulas de una especie determinada se plantan en condiciones climáticas muy similares a las de su procedencia, dada la fuerte asociación procedencia-elevación (clima) (Hernández-Velasco *et al.*, 2017).

[5] Registrada en algunos trabajos como Agua Lardín.

REFERENCIAS

Castellanos-Acuña, D., K.W. Vance-Borland, J.B.S. Clair, A. Hamann, J. López-Upton, E. Gómez-Pineda and C. Sáenz-Romero. 2018. Climate-based seed zones for Mexico: Guiding reforestation under observed and projected climate change. New For. 49: 297–309.

Domínguez-Guerrero, I.K., S. del R. Mariscal-Lucero, J.C. Hernández-Díaz, B. Heinze, J.A. Prieto-Ruiz and C. Wehenkel. 2017. Discrimination of *Picea chihuahuana* Martínez populations on the basis of climatic, edaphic, dendrometric, genetic and population traits. PeerJ 5, e3452. doi:10.7717/peerj.3452.

Flores-López, C., G. Geada-López, C.J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2012. Reproductive indicators in natural populations of *Picea martinezii* T. F. Patterson. Revista Forestal Baracoa 31: 49-58.

Hauke, J. and T. Kossowski. 2011. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. Quaestiones Geographicae 30: 87–93. doi:10.2478/v10117-011-0021-1.

Hernández-Velasco, J., J.C. Hernández-Díaz, M. Fladung, Á. Cañadas-López, J.Á. Prieto-Ruíz and C. Wehenkel. 2017. Spatial genetic structure in four *Pinus* species in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. Canadian Journal of Forest Research 47: 73–80. doi:10.1139/cjfr-2016-0154.

IUCN. Red List of Threatened Species. 2019. Available online: https://www.iucnredlist.org/species/32479/2820455 (Consultada 3 de febrero de 2020).

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3(2): 113-122.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López y M.A. Capó-Arteaga. 2000. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47: 71–88.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss, K.V. Krutovskii, D.B. Neale y T. Eguiluz-Piedra. 2004. Relationships among the Spruces (*Picea*, Pinaceae) of Southwestern North America. Systematic Botany 29: 275-295. doi:10.1600/036364404774195485.

Parker, W.H., A.V. Niejenhuis y P. Charrette. 1994. Adaptive variation in *Picea mariana* from northwestern Ontario determined by short-term common environment tests. Canadian Journal of Forest Research24: 1653–1661.

R Core Team. 2015. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria; Available online: http://www.R-project.org/ (Consultada 3 de febrero de 2020).

Rehfeldt, G.L. 2006. *A Spline Model of Climate for the Western United States*; General Technical Report RMRS-GTR-165; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA. 21 p.

Wehenkel, C. y C. Sáenz-Romero. 2012. Estimating genetic erosion using the example of *Picea chihuahuana* Martínez. Tree Genetics & Genomes 8: 1085–1094. doi:10.1007/s11295-012-0488-5.

Zobel, B.J. y J.T. Talbert. 1988. *Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales*. Limusa, Ciudad de México, México. 545 p.

CAPÍTULO 6

CENSO, ESTRUCTURA DEMOGRÁFICA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE DOS ESPECIES DE *Picea*

Christian Wehenkel [1*], Eduardo Mendoza Maya[2], J. Ciro Hernández Díaz[1]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
*Autor de correspondencia: Christian Wehenkel, wehenkel@ujed.com.mx

INTRODUCCIÓN

Picea mexicana Martínez y *Picea martinezii* T.F. Patt. son dos taxones relictos, endémicos del norte de México, con distribución limitada a la Sierra Madre Oriental y Occidental de manera irregular (Ledig *et al.,* 2004). Se conocen tres poblaciones para *P. mexicana* (Ledig *et al.,* 2002) y cuatro para *P. martinezii* (Ledig *et al.,* 2000a).

Las poblaciones de *Picea* en México presentan diferencias en cuanto a su distribución espacial, así como en la asociación de especies. *Picea mexicana* se encuentra en la Sierra Madre Oriental en altitudes de hasta 3,200 m, y en la Sierra Madre Occidental en una altitud superior a 3,000 m, correspondiendo éstas a las zonas subalpinas (Ledig *et al.,* 2000b; Ledig *et al.,* 2004). *Picea martinezii* se distribuye geográficamente solo en la Sierra Madre Oriental, en asociación con especies que corresponden al tipo de vegetación de bosque mesófilo de montaña (Capó-Artega *et al.,* 1997; Valdez *et al.,* 2003).

Tanto la Norma Oficial Mexicana de protección ambiental NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010) como la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2001; 2004) en el reporte sobre conservación de coníferas, así como la evaluación de Farjon y Page (1999) coinciden en declarar ambas especies en la categoría "En peligro crítico" (CR por su siglas en Inglés); razón por la cual la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (http://www.conabio.gob.mx/), demanda la urgencia de estudios ecológicos y genéticos de estas especies que permitan evaluar el recurso para su conservación.

Para evaluar las amenazas que plantea el cambio climático a una especie, se debe contar con información sobre su vulnerabilidad. En la literatura científica, la "vulnerabilidad de las especies" se define generalmente en función de factores intrínsecos y extrínsecos. Se han desarrollado muchos métodos para evaluar la vulnerabilidad de las especies a los cambios climáticos. Las evaluaciones a menudo consideran la exposición, la sensibilidad y la adaptabilidad, así como una combinación de diferentes modelos y datos. La exposición es la magnitud de la variación climática en las áreas ocupadas por la especie. La sensibilidad, que está determinada por rasgos que son intrínsecos a las especies, es la capacidad de tolerar variaciones climáticas, mientras que la adaptabilidad es la capacidad inherente de las especies para ajustarse a esos cambios (Pacifici *et al.,* 2015).

La diversidad genética es crucial para la estabilidad y adaptabilidad de las especies y está correlacionada positivamente con el tamaño de la población (Frankham, 1996) y, a veces, con la diversidad de especies. Por lo tanto, la diversidad genética se ha identificado como uno de los criterios / indicadores para evaluar la vulnerabilidad de las especies. Por eso, la diversidad alta de especies en un sitio podría ser un indicador de una alta diversidad genética de las especies en ese sitio (Simental-Rodríguez *et al.,* 2014).

Por otra parte, una distribución demográficamente equilibrada del número de árboles de una especie, que describe un cierto equilibrio de los tamaños de los árboles, también es un indicador clásico de la estabilidad de especies. El equilibrio estructural se puede lograr definiendo las distribuciones ideales (p. ej. de la edad) de las especies arbóreas (Wehenkel *et al.,* 2011).

Con respecto a esto último, la relación especie-área, que describe el aumento en el número de especies con un área creciente de muestra, puede ser útil (Rosenzweig, 1995; Hubbell, 2001). Es bien sabido que, dentro de una región geográfica particular, las áreas de bosque contiguas más grandes contienen más especies que los fragmentos de bosque más pequeños. Esta relación permite estimar el área mínima, es decir, el área más pequeña que se requiere para registrar todas las especies que ocurren dentro de una región contigua dada. Si es posible estimar el área mínima de especies, entonces, por analogía, debería ser posible estimar el área de estructura equilibrada (AEE), que se define como el área contigua mínima que incluye todas las etapas de desarrollo de los árboles. Por lo tanto, la AEE puede usarse como un indicador de sostenibilidad demográfica basada en comunidades arbóreas. En una distribución equilibrada de diámetros, la relación entre las clases diamétricas sucesivas (a la altura del pecho, DAP) es constante (Wehenkel *et al.,* 2011).

El objetivo de este estudio es evaluar el estatus actual de las poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii* mediante a) la distribución diamétrica de las poblaciones, b) AEE de las poblaciones, c) la comparación del tamaño poblacional actual con registros históricos y con publicaciones desarrolladas de análisis de estructura genética de poblaciones de ambas especies, y d) la diversidad de especies arbóreas en los sitios con *Picea mexicana* y *Picea martinezii*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se analizó la información disponible de todas las poblaciones documentadas de *Picea mexicana* y *P. martinezii* que se localizan en los estados de Nuevo León, Coahuila, y Chihuahua (Cuadro 6.1).

Métodos

Para definir el estatus actual de las poblaciones, se censó el número de individuos vivos con una altura igual o mayor a 0.3 m en cada población de *Picea mexicana* y *P. martinezii*, de acuerdo con los estudios en *Picea chihuahuana* del trabajo de Ledig *et al.,* (2000a).

Con esta información se analizó la distribución diamétrica y se estimó el tamaño mínimo de áreas con estructuras diamétricas balanceadas (Wehenkel *et al.,* 2011). Las medidas de diámetro se agruparon en 10 clases de 10 cm para detectar irregularidades en las distribuciones de DBH. Los puntos medios de las clases diamétricas inferior y superior fueron 0 y 120 cm, respectivamente. Una distribución de diámetros es balanceada si la relación entre los diámetros de los árboles y el número de árboles es decreciente de manera monótona (Wehenkel *et al.,* 2011). Además, se calculó el índice de plántulas/árboles (Ledig *et al.,* 2000 a, b) que muestra la estabilidad demográfica de las poblaciones.

Se compararon los resultados con los de publicaciones de análisis de estructura genética de poblaciones de ambas especies (Ledig *et al.,* 2000b, Ledig *et al.,* 2002, Ledig *et al.,* 2004, Mendoza-Maya *et al.,* 2015).

Después de la identificación taxonómica de las especies arbóreas, se evaluaron sus índices de diversidad de acuerdo a su riqueza, heterogeneidad y equitatividad, siguiendo la metodología desarrollada por Simental-Rodríguez *et al.,* (2014). Considerado como una función de *a*, el número de Hill (v_a) se utiliza como una medida de diversidad y describe el perfil de la variante para cada distribución de frecuencias. Los valores más ilustrativos del subíndice *a* en tal perfil de diversidad son $a = 0$, donde la diversidad es igual al número total de variantes, $a = 2$ como el número efectivo, y $a = \infty$, donde sólo la variante más frecuente determina la diversidad (Gregorius, 1978). Los números de Hill pueden utilizarse como medidas de diversidad explícitas de especies de árboles en las poblaciones de ambas especies. Formalmente:

$$Va = Va(p) = \left(\sum_i p_i^a \right)^{\frac{1}{1-a}} \qquad [1]$$

Donde *p* es la frecuencia relativa de una variante *i*.

Cuadro 6.1 Localización de las poblaciones de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* T. F. Patt. (Ledig *et al.*, 2000 a, b) que se incluyen en el estudio.

Población	Propiedad	Municipio	Coordenadas geográficas de referencia	Altitud (m snm)
		Picea mexicana		
La Marta	Propiedad privada Felipe de la Peña	Arteaga, Coah.[6]	25° 11' 55" N 100° 21' 52" O	3,494
El Coahuilón	Ejido Nuncio	Arteaga, Coah.	25° 14' 51" N 100° 21' 17" O	3,528
El Mohinora	Ejido El Tule y Portugal	Guadalupe y Calvo, Chih.	25° 57' 41" N 107° 02' 32" O	3,113
		Picea martinezii		
Agua Fría	Propiedad privada: Agua Fría	Aramberri, N.L.	24° 02' 17" N 99° 42' 39" O	1,820
Agua de Alardín	Propiedad privada: Agua de Alardín	Aramberri, N.L.	24° 02' 34" N 99° 44' 04" O	2,120
El Butano	Ejido La Trinidad	Montemorelos, N.L.	25° 10 '41" N 100° 07' 37" O	2,180
La Encantada*	Ejido La Encantada	Zaragoza, N.L.	23° 53' 24" N 99° 47' 30" O	2,515

[6] Previamente registrada como de Rayones, N.L.

Para representar el perfil de la diversidad de especies de árboles (v_a), se seleccionaron las diversidades descritas aplicadas a cada lugar. Así, cada lugar de la comunidad de árboles de *Picea mexicana* y *Picea martinezii* fue caracterizado por el número total de especies de árboles (riqueza de especies, (v_0)), número efectivo de especies de árboles (índice de Simpson, (v_2)) y la diversidad de especies de árboles predominantes (v_∞) en las parcelas muestreadas.

RESULTADOS

La población La Marta es la más grande, con 17,728 individuos de *Picea mexicana*, mientras que la población Agua de Alardín es la mayor para *Picea martinezii*, con 84,498 individuos. Las poblaciones más pequeñas para estas especies son El Coahuilón, con 2,253 individuos de *Picea mexicana* y La Encantada, con 712 individuos de *Picea martinezii*. En la población Mohinora, *Picea mexicana* tiene la frecuencia relativa de regeneración natural (individuos < 5 cm DAP) más alta (0.64), mientras que la población La Encantada de *Picea martinezii*, tiene la frecuencia relativa de regeneración natural más baja (0.19). La comparación entre el censo actual de 2019 y la estimación del tamaño poblacional de Flores-López (2014) muestra para *P. mexicana* un menor número de individuos reales en las poblaciones El Coahuilón, pero un mayor número de individuos en Mohinora y en La Marta, mientras que en el caso de *P. martinezii* se obtuvo un menor número de individuos totales en Agua Fría y Butano y en Agua de Alardín. El índice de Plántulas/Árboles es más grande en *P. mexicana* que en *P. martinezii* (Cuadro 6.2).

Cada una de las siete poblaciones tiene una distribución diamétrica balanceada, considerado un ancho de clase diamétrica de 10 cm (Figura 6.1).

De acuerdo a los datos de los ocho sitios de monitoreo de 50 x 50 m en cada población, las poblaciones de *Picea mexicana* tienen aproximadamente un área de estructura equilibrada (AEE) a partir de una hectárea, mientras que las poblaciones de *P. martinezii* tienen un AEE a partir de dos hectáreas.

La Figura 6.2 muestra el porcentaje relativo de las dos piceas en sus siete comunidades arbóreas. *Picea mexicana* es la especie arbórea dominante en las poblaciones La Marta (con 34 %) y Mohinora (con 41%). En El Coahuilón, *Picea mexicana* es la más importante especie arbórea mixta, con 35%. Por el contrario, *P. martinezii* es solamente una especie arbórea mezclada entre varias, con 9 – 17%, y nunca es la especie arbórea más importante. En un estudio de la regeneración natural de *P. martinezii* en cuatro comunidades (El Butano, Agua de Alardín, La Tinaja y El Bosque, las dos últimas en el Ejido La Encantada) se encontró una densidad de regeneración baja, de entre 300 y 400 individuos ha^{-1} y entre 100 y 366 individuos ha^{-1} de arbolado adulto (López-Martínez, 2018).

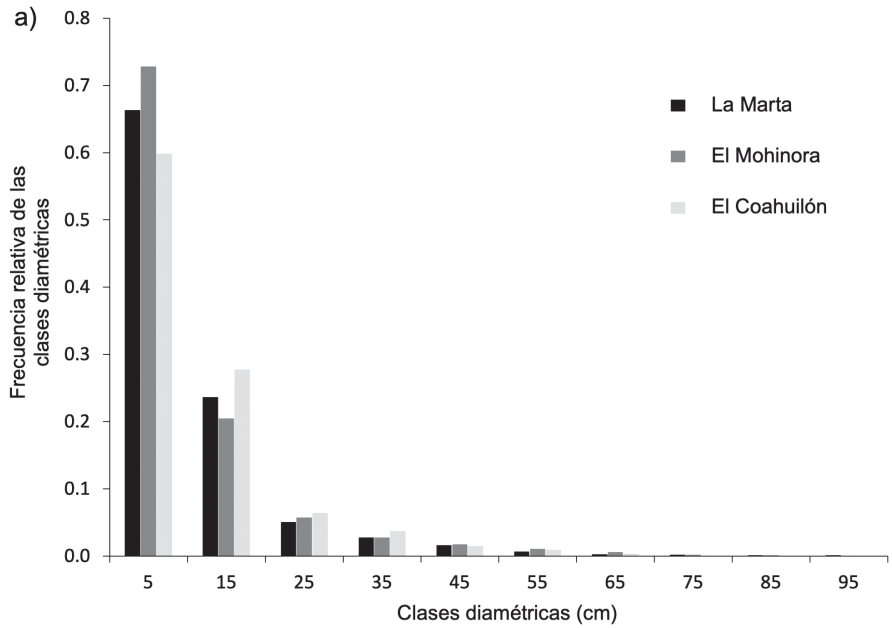
Cuadro 6.2 Censos de los números de individuos vivos en 2019 y 2020* con una altura igual o mayor a 0.3 m en cada población conocida de *Picea mexicana* (Pme) y *P. martinezii* (Pma) (ver Cuadro 6.1). Los valores entre paréntesis son de una estimación del tamaño poblacional realizada por Flores-López (2014)**.

Población	Superficie (ha)	Número total de individuos	Número de individuos < 5 cm diámetro al pecho (DAP) (= plántulas)	Frecuencia relativa de individuos < 5 cm DAP	Plántulas (DAP < 5 cm) /Árboles (individuos ≥ 5 cm DAP)	Diferencia de individuos totales (%)***
Pme-LaMarta	23.1 (33)	17,728 (14,817)	10,589 (12,375)	0.60	1.48 (5.07)	+2,911 (+19.6)
Pme-Mohinora	23.8 (17)	10,860 (4,641)	7,336 (2,924)	0.64	1.81 (1.70)	+6,219 (+134)
Pme-ElCoahuilón	26.5 (65)	2,253 (19,630)	1,273 (10,855)	0.57	1.30 (1.24)	-17,377 (-88.5)
Total Pme	73.3 (115)	30,841 (39,088)	19,198 (26,154)	0.61	1.58 (2.62)	-8,642 (-22.1)
Pma-Aguafría	53.8 (35)	2,769 (10,535)	1,660 (7,070)	0.60	1.50 (2.04)	-7,766 (-73.7)
Pma-Encantada	5.2 (3)	712 (939)	138 (456)	0.19	0.24 (0.94)	-227 (-24.2)
Pma-AguaAlardín	74.3 (15)	84,498 (3,825)	59,938 (3,210)	0.71	2.44 (5.22)	+80,676 (+2,109.1)
Pma-Butano	23.0 (20)	1,253 (7,680)	402 (5,520)	0.33	0.47 (2.56)	-6,427 (-83.7)
Total Pma	156.3 (73)	89,232 (22,979)	62,078 (16,256)	0.46	1.16 (2.41)	+66,253 (+288.3)

*El censo de 2019 se realizó en el periodo de noviembre 2018 (total de poblaciones *Pme-Mohinora*) a agosto de 2019 (Pme-LaMarta y Pme-ElCoahuilón). El censo de 2020 de *P. martinezii* se realizó en el periodo de noviembre 2020 a abril 2021.

**La estimación del tamaño poblacional de Flores-López (2014), se basó en un muestreo de parcelas de monitoreo establecidas en el centro de las poblaciones, que son las zonas de mayor densidad. Por lo que el cálculo del número de individuos de cada población muy probablemente se sobre-estimó al considerarse la superficie total de las poblaciones, las cuales tienen densidades menores en la periferia.

*** Comparación entre estimación del tamaño poblacional 2014 y censo de 2018-21.



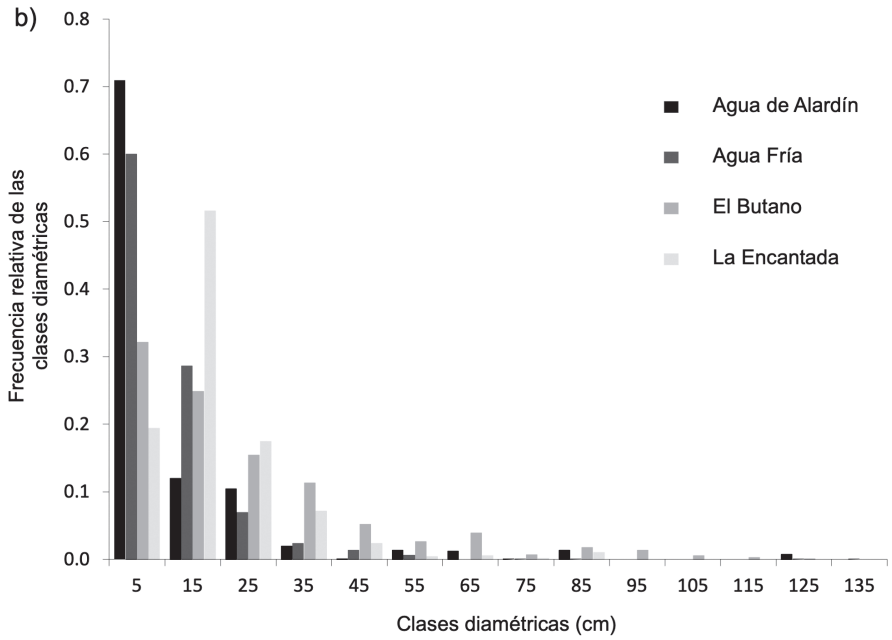


Figura 6.1 Distribuciones diamétricas: a) las tres poblaciones de *Picea mexicana*; b) las cuatro poblaciones de *Picea martinezii*.

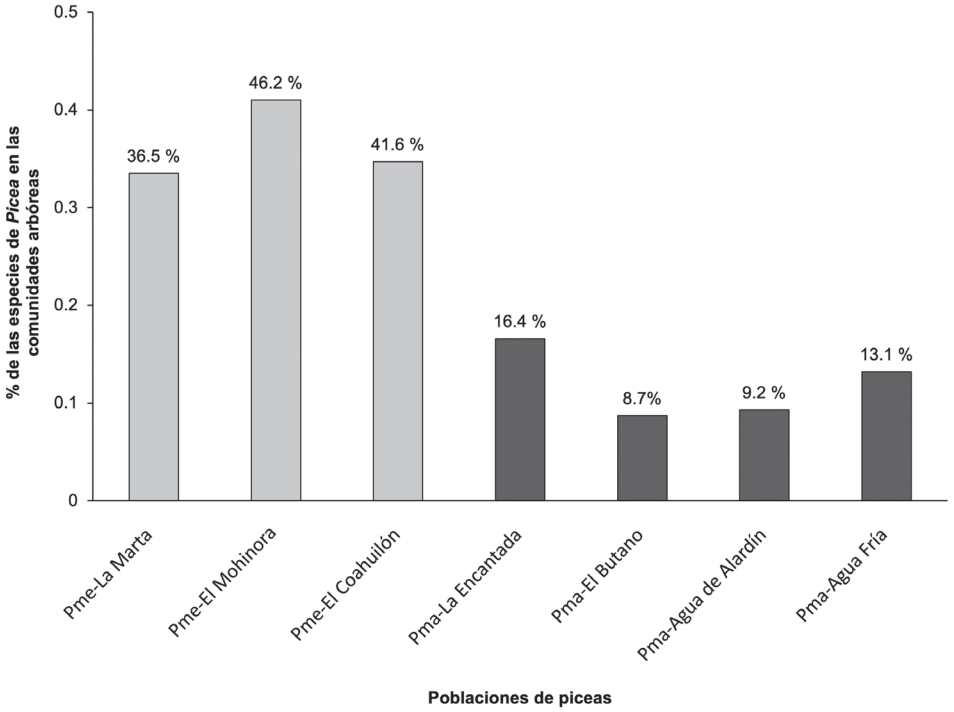


Figura 6.2 Porcentaje relativo de las dos piceas en sus siete comunidades arbóreas (Pme = *Picea mexicana*, Pma = *P. martinezii*), con respecto al total del arbolado en cada población.

Las figuras 6.3a y 6.3b muestran el perfil de la diversidad arbórea de las comunidades de *P. mexicana* y *P. martinezii*. Las comunidades arbóreas de *P. martinezii* muestran una diversidad efectiva (v_2) de 6.0 – 8.6, la cual es mucho mayor que la de las comunidades arbóreas de *P. mexican*a, cuya diversidad es de 3.2 – 4.1. Además, se detectaron 15 – 20 especies arbóreas en las comunidades de *P. martinezii* y solo 6 – 8 especies arbóreas en las de *P. mexicana*. También la diversidad de especies de árboles predominantes (v_∞) es más alta en las comunidades arbóreas de *P. martinezii* que en las de *P. mexicana*.

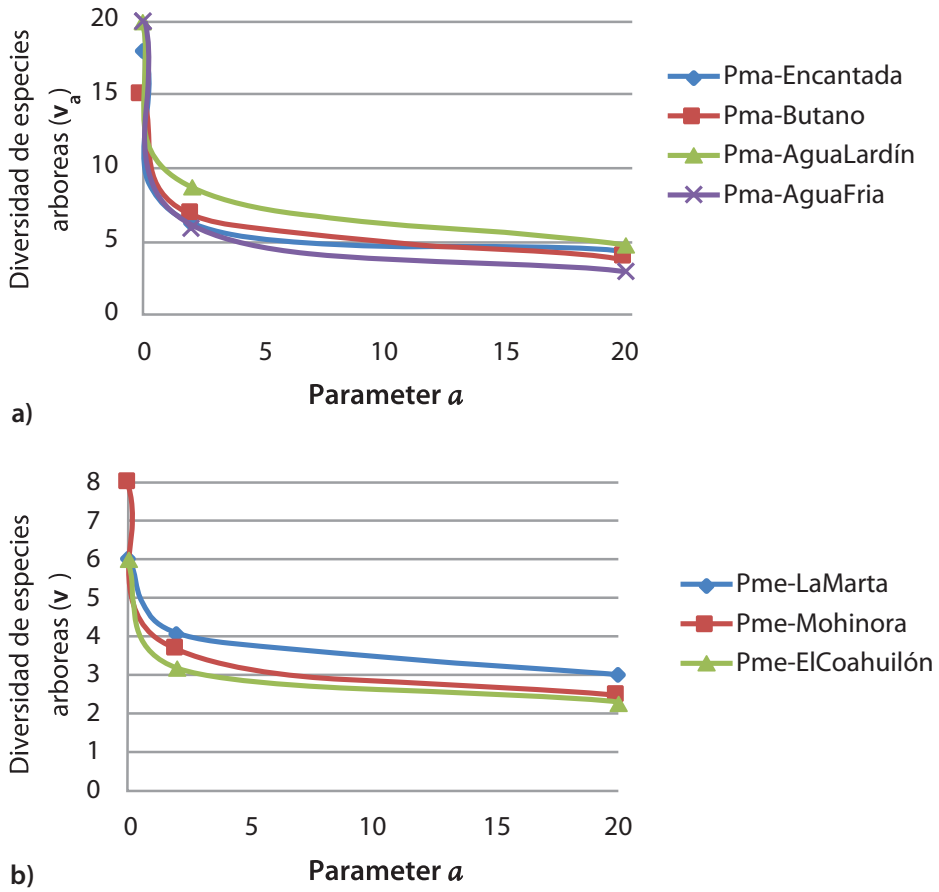


Figura 6.3 a y b: Perfil de la diversidad arbórea (v_a) de las comunidades de: a) *Picea mexicana* y b) *P. martinezii*. v_0 = el número total de especies de árboles (riqueza de especies), v_2 = número efectivo de especies de árboles (índice de Simpson) y $v_{\infty(20)}$ = la diversidad de especies de árboles predominantes.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El censo de 2018 - 2021 mostró que las cuatro poblaciones de *P. martinezii* son mucho más numerosas que las tres poblaciones de *P. mexicana* (Cuadro 6.3). Hubo más regeneración natural que árboles adultos en *P. mexicana* (índice de plántulas/árboles = 1.58 en promedio). Así mismo, hubo má regeneración natural que árboles adultos en *P. martinezii* (índice de plántulas/árboles = 1.16 en promedio), aunque el valor de esta relación es menor que en *P. mexicana* y, en promedio de las dos especies, es mayor al reportado por Ledig *et al.*, (2000) para *Picea chihuahuana* (0.75).

El área mínima de estructura equilibrada (AEE) de las poblaciones de *P. mexicana* fue la mitad (una hectárea) que la de las poblaciones de *P. martinezii* (dos hectáreas). Wehen-

kel *et al.,* (2015) encontraron un AEE similar en *Picea chihuahuana*. La comparación del censo actual en 2018-21 con la estimación del tamaño poblacional de Flores-López (2014) parece mostrar que *P. mexicana* en realidad tiene 22% menos individuos que el valor estimado por este autor, mientras *P. martinezii* tiene un tamaño real de población 288% mayor que el estimado. Sin embargo, por la diferencia en las metodologías utilizadas (en 2014 fue una estimación y en 2019-2021 fue un censo total, ver metodología y Cuadro 6.2), los resultados no son directamente comparables. A excepción de la población de El Coahuilón (*P. mexicana*), durante el recorrido realizado para realizar el censo en 2018-19 no se observaron tocones ni otras evidencias de mortandad de individuos que pudieran confirmar que hubo una disminución acelerada en el tamaño de las poblaciones, principalmente en las de *P. martinezii*.

En el censo 2018-21 las poblaciones de La Marta y El Mohinora de *P. mexicana* tienen un tamaño real de población mayor que el estimado en 2014. En la estimación del tamaño poblacional de 2014 en La Marta la regeneración representó 83.5 % de la población total, mientras que en El Mohinora ésta sólo representó 63 % (Cuadro 6.3). Sin embargo, la estimación del tamaño poblacional se realizó a partir de un muestreo que consideró una superficie mayor a la real de cada población (Cuadro 6.2). Por lo tanto, lo más probable es que, en el lapso de cinco años el número de individuos en las dos especies se mantuvo estable.

Picea mexicana es una especie dominante en sus comunidades arbóreas, mientras que *P. martinezii* es casi rara en sus comunidades arbóreas (Figura 6.2), lo que indica una gran competencia entre *P. mexicana* y *P. martinezii*. Aunque tres poblaciones de *P. martinezii* son ya muy reducidas, de manera interesante su diversidad genética es similar a la de *P. mexicana* (Mendoza-Maya *et al.,* 2015), probablemente en parte porque la diversidad arbórea es más alta en las comunidades de *P. martinezii* que en las de *P. mexicana*, lo que corroboraría la propuesta de Simental-Rodríguez *et al.,* (2014) de que la diversidad de especies arbóreas frecuentemente se asocia en forma positiva con la diversidad genética de las especies. De acuerdo con el censo 2018-2021 y las estimaciones de Flores-López (2014), las cuales representan las únicas fuentes recientes de información al respecto, la mayoría de las poblaciones de *Picea* no muestran problemas graves en la estabilidad demográfica y en la sustentabilidad para las dos especies (Ledig *et al.,* 2000 a,b).

No obstante, esta situación estable puede cambiar por el impacto de varios factores. A corto plazo, los factores que más influyen son la tala de árboles, el pastoreo, sequías, incendios forestales, plagas y enfermedades, que pueden afectar negativamente a las poblaciones; los factores sobresalientes pueden ser el pastoreo intensivo, el cambio climático, y procesos aleatorios que ocurren principalmente en poblaciones reducidas (como la deriva genética, la erosión genética y la endogamia). Los factores más críticos que disminuyen las poblaciones durante el desarrollo inicial de las plántulas podrían ser el efecto de la competencia con otras especies arbóreas y con los árboles dominantes de la misma especie; pastoreo intensivo de herbívoros domésticos (ganado) y silvestres (venado), sequías, incendios forestales, plagas, enfermedades y endogamia, que reduce la viabilidad de las semillas. En la población Agua Fría de *P. martinezii,* el mayor peligro actual lo representa el pastoreo intensivo de chivas. El censo completo

de cada población en 2018-2021, que es parte del presente proyecto, es el primer censo total realizado para estas dos especies. Por lo que es un punto de partida muy claro y recomendable para seguir monitoreando la demografía de estas dos especies de *Picea* en futuros estudios.

Concluimos que se requieren estrategias y acciones dirigidas a conservar y, en su caso, recuperar o expandir las poblaciones de *Picea martinezii* y *P. mexicana*, ya que ambas especies son componentes importantes de sus respectivos hábitats de alto valor, como proveedores de servicios ambientales: *P. martinezii* en hábitats riparios y *P. mexicana* en zonas subalpinas en partes altas de cuencas. Este manejo de conservación de las dos especies debería incluir acciones futuras, que por lo menos mitiguen los impactos de los factores mencionados más arriba, en la disminución de las poblaciones de *Picea* durante el desarrollo inicial de las plántulas en cada población.

REFERENCIAS

Capó-Arteaga, M., S. Valencia-Manzo, C. Flores-López y S. Braham-Sabag. 1997. Informe final de actividades del proyecto: Autoecología del género *Picea* en Nuevo León. Presentado a: Consejo Consultivo Estatal para la Preservación y Fomento de la Flora y Fauna Silvestre de Nuevo León. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. 160 p.

Farjon, A. and C.N. Page (Compilers). 1999. *Conifers. Status survey and conservation action plan*. IUCN/SCC Conifer Specialist Group. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 121 p.

Flores López C. 2014. Líneas para la conservación de los recursos genéticos de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson. Tesis Doctor en Ciencias Forestales. Facultad de Forestal y Agronomía, Centro de Estudios Forestales, Universidad de Pinar Del Río. República de Cuba. 90 p.

Frankham, R. 1996. Relationship of genetic variation to population size in wildlife. Conservation Biology 10(6): 1500-1508.

Gregorius, H.R. 1978. The concept of genetic diversity and its formal relationship to heterozygosity and genetic distance. Mathematical Biosciences 41(3-4): 253-271.

Hubbell, S.P. 2001. *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Princeton University Press, Princeton

Ledig, F.T., B. Bermejo-Velázquez, P.D. Hodgskiss, D.R. Johnson, C. Flores-López and V. Jacob. 2000b. The mating system and genic diversity in Martinez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. Canadian Journal of Forest Research 30(9): 1156-1164.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, C. Flores-López, V. Reyes-Hernández and M.A. Capó-Arteaga. 2000a. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47:71-88.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3(2): 113-122.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss, K. U. Krutovskii, D. B. Neale and T. Eguiluz-Piedra. 2004. Relationships among the Spruces (*Picea,* Pinaceae) at Southwestern North America. Systematic Botany 29(2): 275-295.

López Martínez, J.I. 2018. Regeneración natural en poblaciones de *Picea martinezii* T.F. Patterson distribuidas en el noreste de México. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N.L. 97 p.

Mendoza-Maya, E., J. Espino-Espino, C.Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J.J. Vargas-Hernández and C. Sáenz-Romero. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. Revista Fitotecnia Mexicana 38(3): 235-247.

Pacifici, M., W.B. Foden, P. Visconti, J.E.M. Watson, S.H.M. Butchart, K.M. Kovacs, B.R. Scheffers, D.G. Hole, T.G. Martin, H.R. Akçakaya, R.T. Corlett, B. Huntley, D. Bickford, J.A. Carr, A.A. Hoffmann, G.F. Midgley, P. Pearce-Kelly, R.G. Pearson, S.E. Williams, S.G. Willis, B. Young, B. and C. Rondinini. 2015. Assessing species vulnerability to climate change. Nature climate change 5(3): 215-225.

Rosenzweig, M.L. 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press.

SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. D. O. F. 30 de diciembre de 2010. México. 77 p. Disponible en: https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3552/1/nom-059-semarnat-2010__30-dic-2010.pdf (Consultada 14 de Octubre de 2019)

Simental-Rodríguez, S.L., C.Z. Quiñones-Pérez, D. Moya, E. Hernández-Tecles, C.A. López-Sánchez, and C. Wehenkel. 2014. The Relationship between Species Diversity and Genetic Structure in the Rare *Picea chihuahuana* Tree Species Community, Mexico. PLoS ONE 9(11): e111623. doi:10.1371/journal.pone.0111623

UICN– Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza. 2001. Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN*:* Versión 3.1. Comisión de Supervivencia de Especies de la UICN. UICN, Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. ii + 33 p.

UICN– Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza. 2004. Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN 2004 [en línea]. UICN – Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza, Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. Disponible en: http://www.iucnredlist.org (Consultada 15 de enero de 2013)

Valdez, T.V., R. Foroughbakhch y G. Alanís. 2003. Distribución relictual del bosque mesófilo de montaña en el noreste de México. Ciencia UANL 6(3): 360 - 365.

Wehenkel, C., J.J. Corral-Rivas, J.C. Hernández-Díaz and K.v. Gadow. 2011. Estimating Balanced Structure Areas in multi-species forests on the Sierra Madre Occidental,

Mexico. Annals of Forest Science 68: 385-394.

Wehenkel, C., J.M. Brazão-Protázio, A. Carrillo-Parra, J.H. Martínez-Guerrero and F. Crecente-Campo. 2015. Spatial Distribution Patterns in the Very Rare and Species-Rich *Picea chihuahuana* Tree Community (Mexico). PLoS ONE 10(10): e0140442. doi:10.1371/journal.pone.0140442

CAPÍTULO 7

VARIABLES DASOMÉTRICAS, TOPOGRÁFICAS Y ESTRUCTURA EN POBLACIONES DE DOS ESPECIES DEL GÉNERO *Picea*

Christian Wehenkel[1*], Jonathan G. Escobar Flores[2], J. Ciro Hernández Díaz[1], Carmen Zulema Quiñones Pérez[3], Sergio Leonel Simental Rodríguez[4], Eduardo Mendoza Maya[4]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] CIIDIR, Instituto Politécnico Nacional, Durango, México
[3] Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Guadiana, Durango, C.P. 34371, México
[4] Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
*Autor de correspondencia: Christian Wehenkel, wehenkel@ujed.com.mx

INTRODUCCIÓN

La estructura forestal es tanto un producto como un factor de los procesos del ecosistema y la diversidad biológica. Comprender la estructura forestal puede ayudar a comprender la historia, función y futuro de un ecosistema forestal (Spies, 1998). Además, la alteración del ecosistema proporciona una base esencial para el análisis de los bosques (Pommerening, 2006).

La estructura del bosque se refiere a los patrones de atributos, incluyendo el tipo estructural, tamaño, forma y distribución espacial (vertical y horizontal), como características de componentes, tales como: árboles, arbustos, hierbas y las capas de musgo. Muchos de estos componentes son fundamentales para el funcionamiento y diversidad de los ecosistemas (Spies 1998; Gadow *et al.,* 2012).

La distribución espacial de los árboles puede afectar: i) el grado de competencia entre los árboles vecinos (Moeur, 1993; Miller y Wiener, 1989; Kenkel y Hoskins, 1989; Newton y Jolliffe, 1998), ii) la densidad de árboles (Condit *et al.,* 2000), iii) la distribución del tamaño y la variabilidad, la regeneración, supervivencia, crecimiento, mortalidad y formación de copa de árboles forestales (Kuuluvainen y Pukkala, 1987;

Moeur,1993; Pretzsch, 1995; Guntis *et al.,* 2005) y iv) la diversidad biológica dentro de una comunidad forestal (Li *et al.,* 2009).

Se han establecido numerosas medidas dependientes de la escala para describir la estructura espacial de los árboles (Wehenkel *et al.,* 2015). Una distribución demográfica de una especie es un indicador clásico de la estabilidad de las especies. El equilibrio estructural se puede lograr definiendo las distribuciones ideales (p.ej. la edad) de las especies arbóreas. Debido a que la determinación de la edad es muy costosa y dado que la edad y el diámetro de los árboles (p.ej. a la altura del pecho, DAP) en un sitio se correlacionan fuertemente, el diámetro se usa con mucha frecuencia en lugar de la edad. En una distribución equilibrada de diámetros, la relación entre clases diamétricas sucesivas es constante (Wehenkel *et al.,* 2011).

La comparación de la distribución demográfica de una población en periodos diferentes nos da información sobre el cambio demográfico poblacional con respecto al tiempo. El cambio demográfico en árboles conceptualiza la diferencia entre el número de adiciones (incorporación) y el número de sustracciones (mortalidad) y la reacción a cambios externos (p. ej. cambios ambientales, cambios de interacción intra e inter-específica) e internos (p. ej. cambios genéticos y crecimiento) (Thuiller *et al.,* 2008; Ehrlén y Morris, 2015).

Picea mexicana Martínez y *Picea martinezii* T.F. Patt., son dos de tres especies relicto endémicas del norte de México, con distribución limitada a la Sierra Madre Oriental y Occidental de manera irregular (Ledig *et al.,* 2004). En la actualidad se conocen tres poblaciones de *P. mexicana* (Ledig *et al.,* 2002) y cuatro de *P. martinezii* (Ledig *et al.,* 2000a).

Las poblaciones de *Picea* en México presentan diferencias en cuanto a su distribución espacial, así como en la asociación de especies. *Picea mexicana* se encuentra en la Sierra Madre Oriental en altitudes de 3,200 m y superiores, y en la Sierra Madre Occidental en una altitud superior a 3,000 m, correspondiendo estas a las zonas subalpinas (Ledig *et al.,* 2000b; Ledig *et al.,* 2004). *Picea martinezii* se distribuye geográficamente solo en la Sierra Madre Oriental, en altitudes de 1,800 a 2,500 m y en asociación con especies que corresponden al tipo de vegetación de bosque mesófilo de montaña, como *Quercus laurina*, *Ilex rubra*, *Abies duranguensis* var. *coahuilensis*, *Carpinus caroliniana* y *Taxus globosa* (Capó-Arteaga *et al.,* 1997; Valdez *et al.,* 2003).

El objetivo de este estudio es evaluar variables dasométricas y topográficas y estructura de poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*, a través de sitios permanentes de muestreo de dos hectáreas por población.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

Se analizaron las poblaciones documentadas de *Picea mexicana* y *P. martinezii* que se localizan en los estados de Nuevo León, Coahuila y Chihuahua (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1 Localización de las poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*. (Ledig *et al.,* 2000) que se incluyen en el estudio.

Población	Propiedad	Municipio	Coordenadas geográficas	Altitud (msnm)
		Picea mexicana		
La Marta	Propiedad privada Felipe de la Peña	Arteaga, Coah.[7]	25° 11' 55" N 100° 21' 52" O	3,494
El Coahuilón	Ejido Nuncio	Arteaga, Coah.	25° 14' 51" N 100° 21' 17" O	3,528
El Mohinora	Ejido El Tule y Portugal	Guadalupe y Calvo, Chih.	25° 57' 41" N 107° 02' 32" O	3,113
		Picea martinezii		
Agua Fría	Propiedad privada Agua Fría	Aramberri, N.L.	24° 02' 17" N 99° 42' 39" O	1,820
Agua de Alardín[8]	Propiedad privada Agua de Alardín	Aramberri, N.L.	24° 02' 34" N 99° 44' 04" O	2,120
El Butano	Ejido La Trinidad	Montemorelos, N.L.	25° 10 '41" N 100° 07' 37" O	2,180
La Encantada	Ejido La Encantada	Zaragoza, N.L.	23° 53' 24" N 99° 47' 30" O	2,515

Las figuras 7.1 – 7.4 muestran la localización de las poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*, incluidos los sitios permanentes que se utilizaron en el estudio.

[7] Previamente registrada como de Rayones, N.L.
[8] Registrada en algunos trabajos como Agua Lardín.

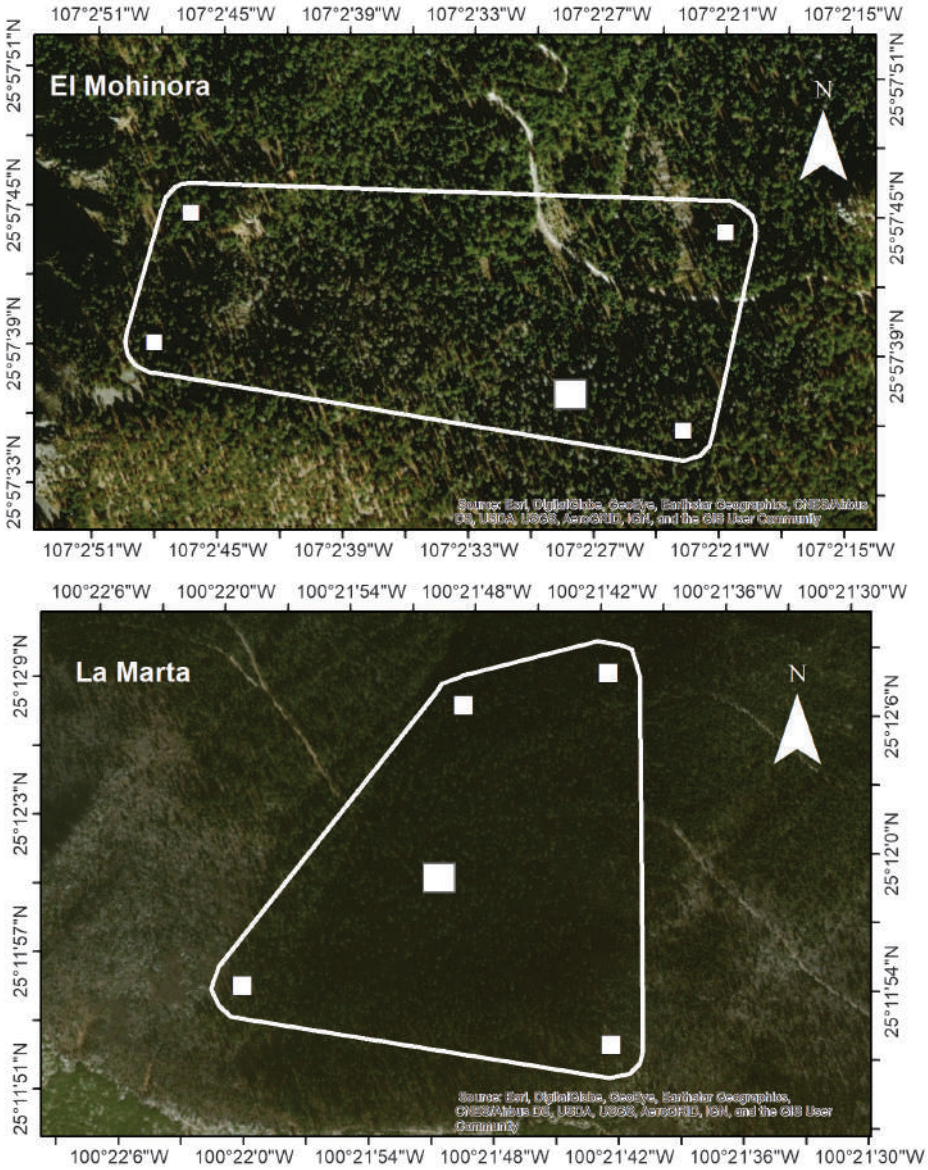


Figura 7.1 Localización de las poblaciones El Mohinora y La Marta de *Picea mexicana*; cuadrados blancos pequeños = sitios permanentes de 50 x 50 m (0.25 ha) que se utilizaron en el estudio; el cuadrado blanco grande = sitio permanente de 100 x 100 m (1.00 ha).

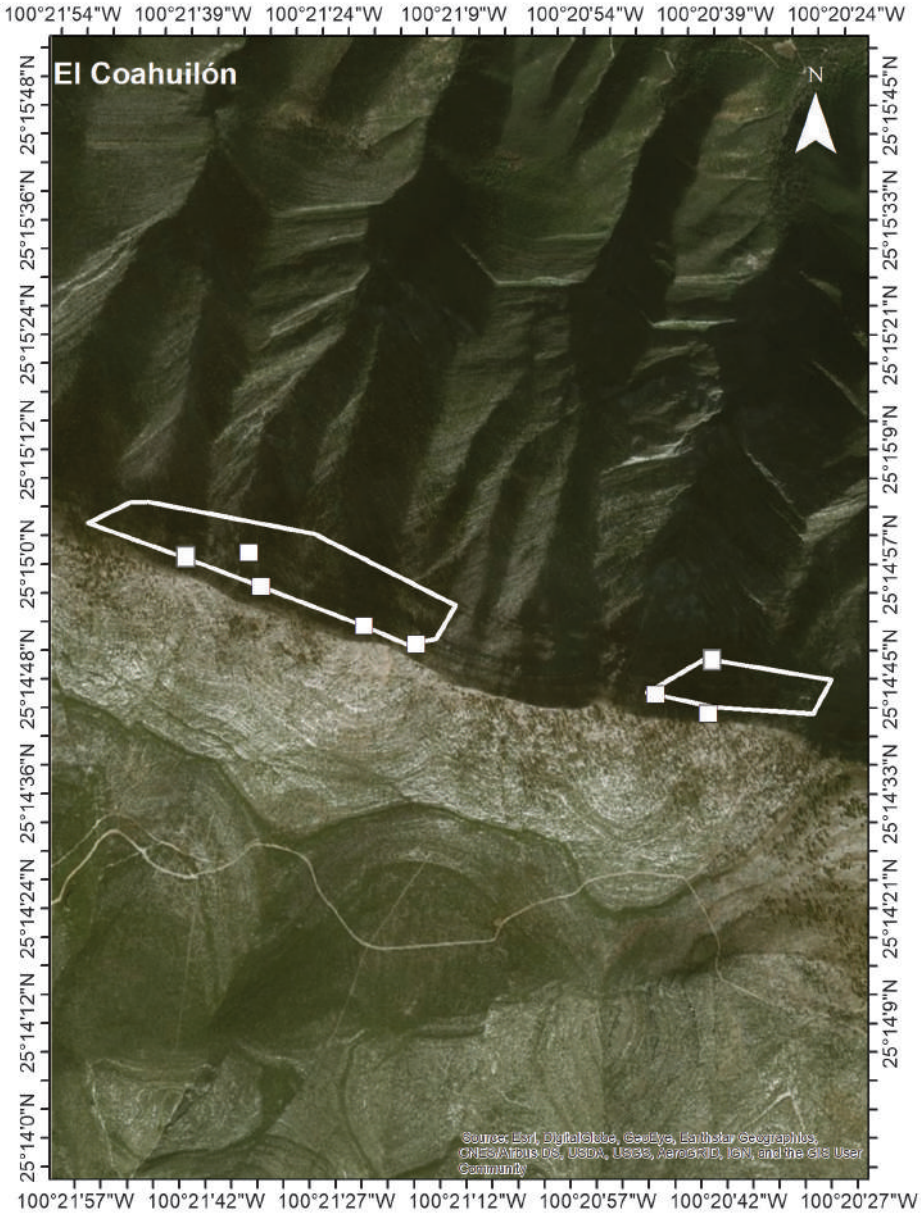


Figura 7.2 Localización de la población El Coahuilón de *Picea mexicana*; cuadrados blancos = sitios permanentes de 50 x 50 m (0.25 ha) que se utilizaron en el estudio.

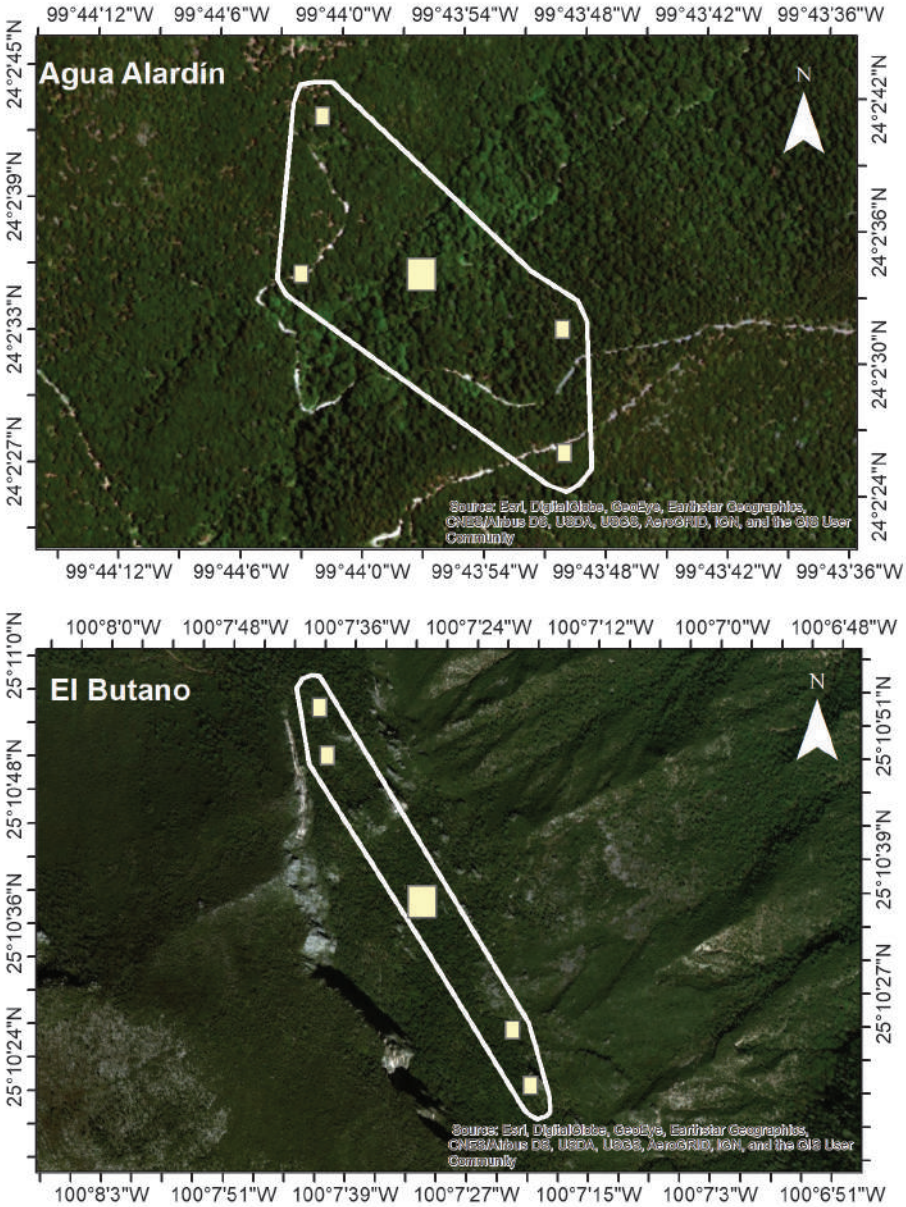


Figura 7.3 Localización de las poblaciones Agua de Alardín y El Butano de *Picea martinezii*; cuadrados blancos = sitios permanentes de 50 x 50 m (0.25 ha) que se utilizaron en el estudio.

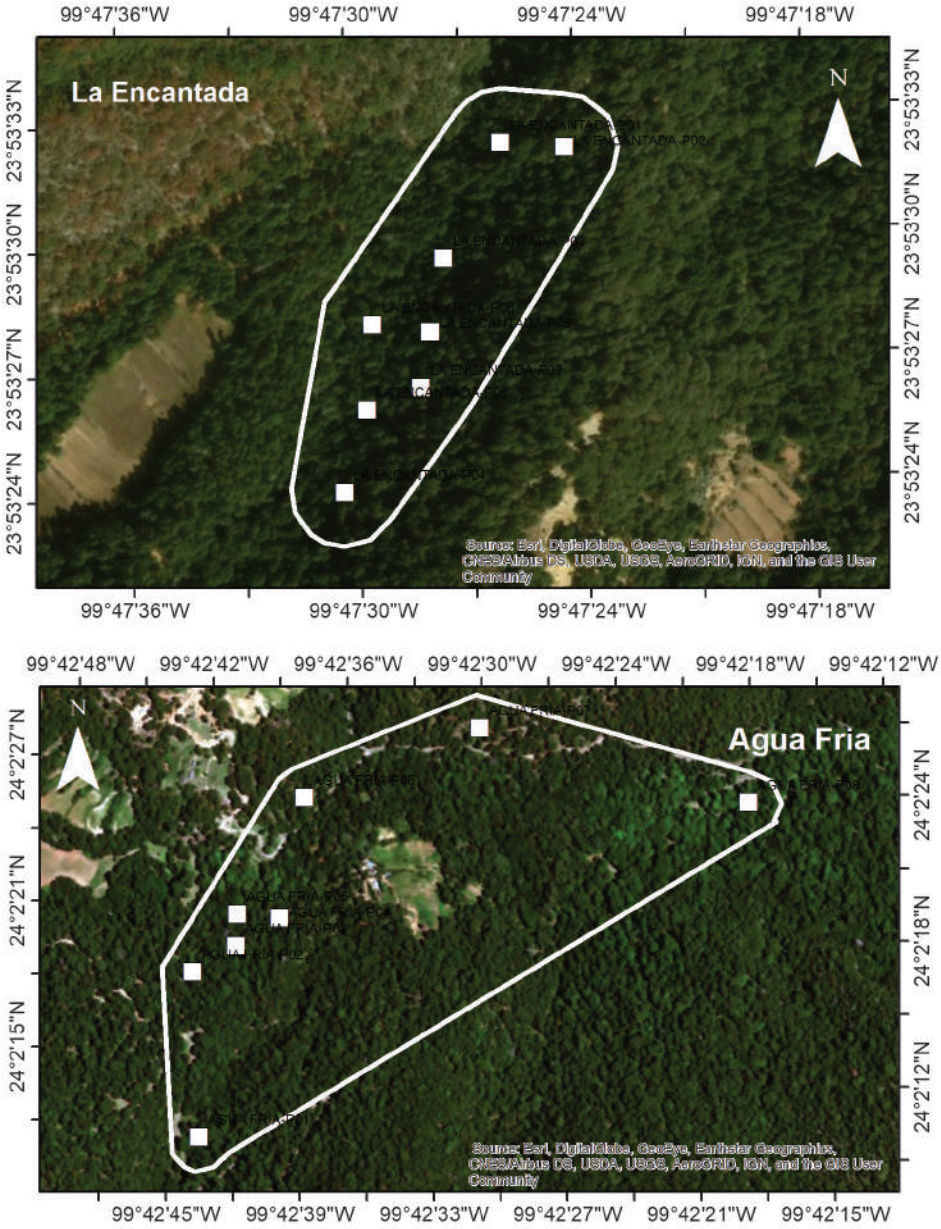


Figura 7.4 Localización de las poblaciones La Encantada y Agua Fría de *Picea martinezii*; cuadrados blancos = sitios permanentes de 50 x 50 m (0.25 ha) que se utilizaron en el estudio.

Métodos

Establecimiento de sitios permanentes y evaluación de estructura

Los cinco sitios permanentes que se utilizaron en el estudio incluyen una parcela de 100 x 100 m (1.00 ha) establecida de preferencia en el centro de las poblaciones y otras cuatro subparcelas de 50 x 50 m (0.25 ha) de preferencia en las cuatro esquinas de cada parcela o de cada población, según lo permitieron las condiciones en el terreno y siguiendo la metodología utilizada por Wehenkel *et al.,* (2015). En las poblaciones de *P. martinezii* y en El Coahuilón (*P. mexicana*), fue necesario modificar la distribución ideal de los sitios debido al tamaño de las poblaciones, las condiciones locales (incluyendo cañones y arroyos) y la distribución de los árboles (por ejemplo, en forma de manchones). Todos los árboles mayores a 7.0 cm de diámetro normal (*d*, a 1.3 m altura desde la base del árbol) fueron evaluados y registrados, incluyendo todas las especies encontradas. Una vez numerados los árboles de cada parcela a la altura de 1.30 m, en todos ellos se midieron las siguientes variables: coordenadas X y Y de cada árbol (*dm*), diámetro normal (*d*, cm), altura total (*h*, m), altura de la primera rama viva (h_{cv}, m), altura del primer nudo de ramas muertas (h_{cm}, m), altura del radio máximo de copa (h_{mc}, m), clase sociológica (distinguiendo entre dominantes, codominantes, intermedios y suprimidos) y otras características, como su estatus (vivo o muerto), rectitud del tronco, etc. Asimismo, se midió el diámetro máximo de copa (d_c, m). El diámetro normal se midió con una forcípula de aproximación milimétrica tomando dos medidas en cruz, la primera con orientación norte-sur y la segunda este-oeste.

Las alturas (total, de la primera rama viva, del primer nudo de ramas muertas y del radio máximo de copa) se midieron con un hipsómetro Vertex III®, obteniendo el promedio con base en tres observaciones para cada árbol. El diámetro máximo de copa se midió con una cinta métrica en dos direcciones (sentido norte – sur y sentido este – oeste) tomando como centro la vertical del ápice del árbol. Con esta información se estimó el número de árboles por hectárea (N), el área basal (G), el diámetro cuadrático medio (d_g), el diámetro normal medio (d), altura total media (h), así como el diámetro máximo (d_{max}) y altura máxima (h_{max}) de todas las especies arbóreas presentes en el sitio y de los árboles bajo estudio. Además, se midieron seis variables topográficas (elevación, pendiente, orientación azimutal, curvatura, plan de curvatura, perfil de curvatura, índice de rugosidad del terreno e índice de humedad) (Domínguez-Guerrero *et al.,* 2017).

Los índices de Clark-Evans (CE) y de uniformidad de ángulos ($\overline{W}$) se utilizaron para describir la distribución espacial de los árboles en cada sitio estudiado. El índice CE se estimó utilizando un solo vecino (n = 1). Con base en un patrón de distribución de Poisson, donde la agrupación de árboles se caracterizó considerando que: un valor de CE = 1 indica una distribución aleatoria del arbolado, CE < 1 indica una tendencia a la distribución regular de los árboles, mientras que CE > 1 indica una tendencia al agrupamiento (clúster). Cuando CE es al valor máximo de 2.1491 indica una disposición hexagonal de los árboles (Clark y Evans, 1954).

El índice de uniformidad de ángulos propuesto por Gadow *et al.,* (1998), permite caracterizar el patrón espacial, midiendo únicamente los rumbos de un árbol aleatorio a sus vecinos más próximos y comparando los ángulos reales con el ángulo de referencia que se obtendría en una distribución regular. En caso de considerar cuatro vecinos Gadow *et al*., (1998) propone un ángulo de referencia de 72 grados. Un $\overline{W} < 0.5$ indica una tendencia a la distribución regular de los árboles y un $\overline{W} > 0.5$ indica una tendencia al agrupamiento (clúster).

Para eliminar el efecto de borde y por lo tanto mejorar la precisión de las estimaciones de la distribución espacial de los árboles, se excluyeron los árboles cuyas proyecciones de copa cayeron en algún borde del sitio (nearest- neighbour edge-correction concept (NN1)) (Pommerening y Stoyan 2006).

RESULTADOS

Resultados de variables dasométricas

Se establecieron 35 sitios permanentes con 8,672 árboles con diámetro normal ≥ 7.0 cm en 14 hectáreas en total. El Cuadro 7.2 muestra la estadística descriptiva de variables dasométricas para las comunidades de especies arbóreas con las que convive *Picea mexicana* y el Cuadro 7.3 muestra las mismas estadísticas referidas solo a los árboles de *Picea mexicana*, con base en los sitios permanentes (2 hectáreas) estudiados en cada población. La comunidad de especies arbóreas, incluyendo a *Picea mexicana* en El Mohinora presenta los árboles más grandes y un área basal (G/ha) más alta, con 41.3 m²/ha (Cuadro 7.2). En contraste, El Coahuilón muestra los árboles más pequeños y una densidad y área basal más bajas (237.5 N/ha y 8.1 m²/ha). Por separado (Cuadro 7.3), *Picea mexicana* en El Mohinora presenta los árboles más grandes y un área basal más alta con 13.0 m²/ha; en cambio, El Coahuilón muestra árboles más pequeños y densidad más baja (82.5 N/ha y 2.0 m²/ha). La Marta exhibe la mayor densidad arbórea en general (788.5 N/ha) y también la mayor densidad de *Picea mexicana* en particular (264.5 N/ha).

Cuadro 7.2 Estadística descriptiva de variables dasométricas basadas en los sitios permanentes (2 hectáreas) por comunidad de todas las especies arbóreas, incluyendo *Picea mexicana* (árboles con diámetro normal ≥ 7.0 cm). *d* = diámetro normal medio, d_g = diámetro cuadrático medio, *h* = altura total, h_{cv} = altura de la primera rama viva, h_{cm} = altura del primer nudo de ramas muertas, h_{mc} = altura del radio máximo de copa, D_c = el diámetro máximo de copa; máx. = máximo, *N/ha* = número de árboles por hectárea, *G/ha* = área basal por hectárea, DE = desviación estándar, min. = mínimo.

Comunidad de especies arbóreas		d (cm)	d_g (cm)	h (m)	h_{cv} (m)	h_{cm} (m)	h_{mc} (m)	D_c (m)	N/ha (No.)	G/ha (m^2)
El Coahuilón	máx.	67.0		24.7	19.1	15.8	12.5	8.1		
	promedio	17.8	20.9	7.4	2.4	1.4	0.7	2.7	237.5	8.1
	DE	10.9		3.9	2.7	2.2	1.6	1.6		
	min.	7.0		1.9	0.0	0.0	0.0	1.2		
El Mohinora	máx.	95.0		43.5	29.1	26.4	24.2	13.1		
	promedio	26.8	34.0	12.7	4.9	3.0	1.2	4.1	454.5	41.3
	DE	21.0		8.5	5.3	3.8	2.0	2.4		
	min.	7.0		2.0	0.0	0.0	0.0	1.0		
La Marta	máx.	74.9		29.7	24.6	18.4	18.4	10.8		
	promedio	18.1	21.6	11.1	4.8	2.6	1.1	3.3	788.5	29.0
	DE	11.9		5.7	4.4	3.2	1.8	1.6		
	min.	6.2		1.8	0.0	0.0	0.0	1.4		
Promedio		20.7	26.0	11.0	4.5	2.5	1.1	3.9	493.5	26.1

A continuación, se muestra la estadística descriptiva de variables dasométricas para la comunidad general de especies arbóreas que conviven con *Picea martinezii* (Cuadro 7.4) y, en particular, para los árboles de *Picea martinezii* (Cuadro 7.5), según lo observado en los sitios permanentes (2 hectáreas) en cada población. La comunidad general de especies arbóreas en Agua de Alardín presentó los árboles con diámetros más grandes (21.3 cm), pero solamente una densidad y área basal promedio con 525.5 N/ha y 27.7 m^2/ha. En contraste, La Encantada mostró árboles con diámetros más pequeños (15.0 cm), pero una densidad y área basal más altas (1,173 N/ha y 31.8 m^2/ha). Por separado, *Picea martinezii* en Agua de Alardín presentó diámetros más grandes (29.6 cm) y mayor área basal, con 5.5 m^2/ha. Agua Fría mostró árboles medianos y el área basal más baja (2.3 m^2/ha). La Encantada exhibió el mayor número de árboles de *P. martinezii* por hectárea, con 194.5 N/ha.

Cuadro 7.3 Estadística descriptiva de variables dasométricas basadas en los sitios permanentes (2 hectáreas) por cada población arbórea, considerando solamente a *Picea mexicana* (árboles con diámetro normal ≥ 7.0 cm). *d* = diámetro normal medio, d^g = diámetro cuadrático medio, *h* = altura total, h_{cv} = altura de la primera rama viva, h_{cm} = altura del primer nudo de ramas muertas, h_{mc} = altura del radio máximo de copa, D_c = el diámetro máximo de copa, *N/ha* = número de árboles por hectárea, *G/ha* = área basal por hectárea; máx. =máximo, DE = desviación estándar, min. = mínimo.

Población		d (cm)	d_g (cm)	h (m)	h_{cv} (m)	h_{cm} (m)	h_{mc} (m)	D_c (m)	N/ha (No.)	G/ha (m^2)
El Coahuilón	máx.	56.2		22.3	14	14	12.5	7.5		
	promedio	15.4	17.6	8.2	2.8	1.3	0.6	3.2	82.5	2.0
	DE	8.6		4.0	2.5	2.0	1.4	1.0		
	min.	7		2.2	0.3	0	0	1.2		
El Mohinora	máx.	82.5		38.2	27.5	21.9	7.8	11.6		
	promedio	23.9	29.8	12.6	5.7	3.6	1.1	4.3	186.5	13.0
	DE	17.7		8.1	5.4	4.0	1.3	1.9		
	min.	7		2.8	0.4	0	0	1.0		
La Marta	máx.	74.9		29.1	18	12.3	6.9	9.1		
	promedio	16.4	19.7	9.9	3.1	1.1	0.6	3.5	264.5	8.0
	DE	10.9		5.1	2.7	1.5	0.8	1.3		
	min.	7		2.1	0.3	0	0	1.5		
Promedio		18.9	23.4	10.6	4.0	2.0	0.8	3.8	177.8	7.7

Cuadro 7.4 Estadística descriptiva de variables dasométricas basadas en los sitios permanentes (2 hectáreas) por comunidad de todas las especies arbóreas, incluyendo a *Picea martinezii* (árboles con diámetro normal ≥ 7 cm). *d* = diámetro normal medio, d_g = diámetro cuadrático medio, *h* = altura total, h_{cv} = altura de la primera rama viva, h_{cm} = altura del primer nudo de ramas muertas, h_{mc} = altura del radio máximo de copa, D_c = el diámetro máximo de copa *N/ha* = número de árboles por hectárea, *G/ha* = área basal por hectárea; máx. =máximo, DE = desviación estándar, min = mínimo.

Comunidad de especies arbóreas		d (cm)	d_g (cm)	h (m)	h_{cv} (m)	h_{cm} (m)	h_{mc} (m)	D_c (m)	N/ha (No.)	G/ha (m^2)
Agua de Alardín	máx.	96.2		47.4	36.1	26.1	25.0	19.0		
	promedio	21.3	25.9	13.8	9.8	5.2	1.2	6.2	525.5	27.7
	DE	14.7		7.8	5.9	4.0	2.8	2.4		
	min.	3.8		0.5	0.3	0.1	0.0	1.8		
Agua Fría	máx.	98.6		46.0	32.0	24.1	18.0	27.2		
	promedio	20.8	24.7	15.6	10.9	6.8	2.6	6.1	503.5	24.1
	DE	13.2		6.8	5.4	4.0	3.1	2.7		
	min.	2.7		1.3	1.1	0.3	0.0	1.6		
El Butano	máx.	75.8		36.5	28.5	20.3	15.4	14.9		
	promedio	20.2	23.3	13.5	9.1	5.5	1.4	5.6	653.0	27.8
	DE	11.5		6.3	4.5	3.7	2.2	2.1		
	min.	4.2		1.2	0.7	0.1	0.0	0.9		
La Encantada	máx.	71.0		35.5	24.5	23.0	19.0	15.9		
	promedio	15.0	18.6	11.0	8.1	5.5	2.7	4.0	1173.0	31.8
	DE	10.9		5.3	4.3	3.8	2.8	1.8		
	min.	1.6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Promedio		18.4	22.3	12.9	9.1	5.7	2.1	5.2	713.8	27.9

Cuadro 7.5 Estadística descriptiva de variables dasométricas basadas en los sitios permanentes (2 hectáreas) por cada población arbórea, considerando solamente a *Picea martinezii* en particular (árboles con diámetro normal ≥ 7 cm). *d* = diámetro normal medio, d_g = diámetro cuadrático medio, *h* = altura total, h_{cv} = altura de la primera rama viva, h_{cm} = altura del primer nudo de ramas muertas, h_{mc} = altura del radio máximo de copa, D_c = el diámetro máximo de copa *N/ha* = número de árboles por hectárea, *G/ha* = área basal por hectárea; máx. =máximo, DE = desviación estándar, min = mínimo.

Población		d (cm)	d_g (cm)	h (m)	h_{cv} (m)	h_{cm} (m)	h_{mc} (m)	D_c (m)	N/ha (No.)	G/ha (m^2)
Agua de Alardín	máx.	93		47.4	33.2	24.4	20.1	11.6		
	promedio	29.6	37.8	19.2	12.1	7.2	3.5	5.9	49	5.5
	DE	23.6		12.2	9.2	6.2	4.9	2.1		
	min.	5.8		5.5	1.6	0.1	0.0	2.1		
Agua Fría	máx.	70.5		39	30.5	23	18	10.6		
	promedio	17.9	21.1	13.7	7.8	4.8	2.1	5.4	66.5	2.3
	DE	11.3		6.8	5.5	4.2	3.0	1.7		
	min.	3.0		3.0	1.2	0.3	0.0	2.2		
El Butano	máx.	71.5		36.5	24	16.4	14.8	14.5		
	promedio	26.7	32.1	16.6	9.4	5.4	2.4	6.3	57	4.6
	DE	17.9		8.6	5.6	4.0	2.9	2.7		
	min.	5.5		3.8	1.5	0.1	0.0	2.8		
La Encantada	máx.	64.1		35.5	22.4	15.7	13.2	11.2		
	promedio	14.8	17.1	12.3	8.3	5.7	2.0	3.9	194.5	4.5
	DE	8.5		4.9	3.9	3.0	1.6	1.5		
	min.	2.6		1.5	1.1	0.5	0.0	1.2		
Promedio		19.2	24.2	14.1	8.9	5.7	2.3	4.8	91.8	4.2

Resultados de variables topográficas

Los cuadros 7.6 a 7.12 presentan un muestreo de cinco variables topográficas por población, incluyendo: pendiente, orientación azimutal, índice de rugosidad vectorial del terreno (VRM), plan de curvatura, perfil de curvatura.

Población El Coahuilón

La pendiente de la población en El Coahuilón (*Picea mexicana*) es alta, con rangos entre 39 y 45°. Los índices de rugosidad mayores a 0.20 indican que la topografía es ondulada con orientaciones de ladera norte y noroeste. Los parámetros de curvatura indican que los sitios son cóncavos, lo que suscita que las corrientes hídricas se aceleren (Cuadro 7.6).

Cuadro 7.6 Variables topográficas en la población de El Coahuilón (*Picea mexicana*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	25°14’49.1”	100°21’16.7”	41.6	18.5	0.31	79.5	289.0
2	25°14’51.1”	100°21’20.5”	41.8	18.1	0.33	88.4	284.8
3	25°14’51.2”	100°21’22.6”	39.6	18.7	0.27	81.6	369.8
4	25°14’55.7”	100°21’34.3”	42.5	18.2	0.29	73.4	287.4
5	25°14’43.0”	100°20’49.4”	43.1	18.6	0.21	78.4	248.9
6	25°14’58.9”	100°20’42.6”	45.6	20.1	0.24	78.4	248.9
7	25°14’59.3”	100°21’35.6”	40.2	19.6	0.24	79.3	268.7
8	25°14’40.8”	100°20’43.4”	39.5	21.0	0.26	78.4	278.8

Población El Mohinora

La población de El Mohinora (*Picea mexicana*) se caracterizó por localizarse en curvaturas convexas y por lo tanto los flujos hídricos tienden a desacelerarse. La rugosidad es muy variable con valores desde 0.01 que indica sitios planos, hasta sitios con valores mayores a 0.20 que corresponden a valles con pendiente mayor a 30 grados. La orientación de las laderas oscila de 357° hasta 61°, indicando que la población se encuentra tanto en laderas norte como noreste (Cuadro 7.7).

Cuadro 7.7 Variables topográficas en la población de El Mohinora (*Picea mexicana*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura
1	25°57’43.00”	107° 2’20.30”	28.5	60.9	0.19	-55.4	-63.9
2	25°57’43.50”	107° 2’45.90”	35.5	12.8	0.23	-25.2	-69.7
3	25°57’37.87”	107° 2’47.56”	39.6	357.0	0.24	-37.9	-74.0
4	25°57’35.75”	107° 2’27.40”	32.1	352.4	0.26	-78.2	-101.6
5	25°57’34.04”	107° 2’22.02”	36.6	21.5	0.31	-79.0	-104.2
6	25°57’51.96”	107° 1’57.88”	36.8	36.3	0.29	-81.2	-105.6
7	25°58’06.24”	107° 1’33.68”	32.5	12.4	0.01	-39.4	-52.1

Población La Marta

Las pendientes en La Marta (*Picea mexicana*) están entre 20 y 30°. Las orientaciones azimutales de las laderas indican posiciones norte y algunas noreste. Los variables de curvatura fueron de tipo cóncavo para todas las muestras, lo que sugiere que las corrientes hídricas en estos puntos tienden a acelerarse. Respecto a la rugosidad, los valores fueron muy bajos, lo que representa sitios que están en topoformas que no varían y normalmente son lomeríos o zonas de transición con valles (Cuadro 7.8).

Cuadro 7.8 Variables topográficas en la población La Marta (*Picea mexicana*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	25°11’58.39”	100°21’51.22”	28.5	13.3	0.01	111.7	760.4
2	25°11’55.90”	100°21’44.80”	27.3	14.4	0.02	109.9	567.8
3	25°11’54.00”	100°22’00.90”	30.2	19.3	0.10	104.8	435.4
4	25°12’07.10”	100°21’42.80”	29.5	13.7	0.12	108.3	939.4
5	25°12’05.90”	100°21’49.80”	24.5	14.5	0.14	110.3	231.4
6	25°12’47.00”	100°24’47.36”	30.2	19.3	0.10	104.8	635.4
7	25°12’48.40”	100°25’00.50”	31.2	13.2	0.12	109.1	253.4
8	25°12’33.02”	100°24’04.13”	25.5	19.4	0.09	111.2	289.3
9	25°12’19.33”	100°23’10.56”	26.1	21.2	0.10	123.4	231.4
10	25°12’11.60”	100°22’08.60”	24.5	14.5	0.14	110.3	231.4

Población Agua de Alardín

La población de Agua de Alardín (*Picea martinezii*) tuvo pendientes entre 21 y 30°. La rugosidad del terreno fue ligeramente ondulada con valores entre 0.17 y 0.36. La mayor parte de la orientación de la población fue oeste y suroeste con perfiles de curvatura convexos (Cuadro 7.9).

Población Agua Fría

La población Agua Fría (*Picea martinezii*) se localizó en sitios con pendientes pronunciadas hasta de 38 grados, lo cual se reflejó en valores de rugosidad mayores a 0.30 que indican la presencia de cañones y acantilados. Los parámetros de curvatura indican topoformas convexas, que se caracterizan por desacelerar el flujo de las corrientes hídricas (Cuadro 7.10).

Cuadro 7.9 Variables topográficas en la población de Agua de Alardín (*Picea martinezii*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	24°02’41.3”	99°44’02.7”	27.7	296.5	0.10	73.8	105
2	24°02’33.9”	99°44’03.7”	30.2	290.2	0.15	74.6	106.9
3	24°02’31.6”	99°43’59.8”	24.6	298.5	0.11	78.9	104.5
4	24°02’32.4”	99°43’53.2”	29.5	288.6	0.19	71.3	105.2
5	24°02’31.1”	99°43’53.2”	23.6	278.9	0.24	76.9	102.3
6	24°02’31.3”	99°43’51.5”	28.5	241.9	0.36	74.0	104.5
7	24°02’30.2”	99°43’51.9”	21.2	298.3	0.17	74.6	105.9
8	24°02’25.0”	99°43’51.4”	29.6	278.3	0.19	73.9	101.3

Cuadro 7.10 Variables topográficas en la población de Agua Fría (*Picea martinezii*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	24°02’22.8”	99°42’19.7”	38.3	354.9	0.37	-141.2	-149.3
2	24°02’26.3”	99°42’31.6”	37.4	353.6	0.35	-140.6	-148.3
3	24°02’23.7”	99°42’39.6”	34.9	352.5	0.34	-141.1	-144.2
4	24°02’18.8”	99°42’40.9”	33.7	341.2	0.39	-139.8	-149.1
5	24°02’19.0”	99°42’42.8”	37.6	302.5	0.37	-140.4	-145.3
6	24°02’17.7”	99°42’ 42.9”	32.1	312.3	0.34	-140.8	-141.2
7	24°02’16.7”	99°42’ 44.9”	36.6	361.7	0.31	-140.6	-143.3

Población El Butano

La población de El Butano (*Picea martinezii*) tiene pendientes de entre 21 y 25°. La rugosidad del terreno es ligeramente ondulada con valores menores a 0.10. La mayor parte de las orientaciones de la población tiene perfiles de curvatura convexos que desaceleran el flujo de las corrientes hídricas (Cuadro 7.11).

Cuadro 7.11 Variables topográficas en la población de El Butano (*Picea martinezii*).

Muestras	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	O	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	25°10’20.56”	100°07’ 22.58”	21.2	67.8	0.08	-324.0	223.0
2	25°10’22.37”	100°07’ 22.49”	22.1	59.4	0.12	-327.9	257.4
3	25°10’23.78”	100°07’ 23.00”	20.5	63.8	0.06	-326.5	2369
4	25°10’24.36”	100°07’ 24.28”	22.4	65.2	0.09	-324.6	241.2
5	25°10’31.95”	100°07’ 30.17”	21.5	64.7	0.01	-321.4	263.4
6	25°10’48.40”	100°07’ 40.89”	28.7	68.9	0.04	-322.5	298.7
7	25°10’54.78”	100°07’ 41.80”	24.6	67.7	0.05	-327.7	104.9
8	25°10’17.07”	100°07’ 20.94”	25.3	56.8	0.09	-321.4	232.5

Población La Encantada

La pendiente de la población La Encantada (*Picea martinezii*) es ligera con rangos de valores entre 10 y 18°. Los valores de rugosidad menores a 0.10 indican que la topografía es plana con orientaciones de ladera sur y sureste. Los parámetros de curvatura indican que los sitios fueron cóncavos que promueven que las corrientes hídricas se aceleren (Cuadro 7.12).

Cuadro 7.12 Variables topográficas en la población de La Encantada (*Picea martinezii*).

Muestra	Coordenadas		Variables topográficas				
	N	E	Pendiente (°)	Orientación azimutal (°)	Índice de rugosidad vectorial	Perfil curvatura (°)	Plan curvatura (°)
1	23°53’26.67”	99°47’29.53”	16.5	111.5	0.01	60.7	145.2
2	23°53’25.34”	99°47’29.82”	14.2	112.3	0.01	65.7	136.0
3	23°53’26.89”	99°47’31.02”	17.4	109.5	0.05	59.4	198.0
4	23°53’24.85”	99°47’31.26”	18.6	132.5	0.04	70.8	147.0
5	23°53’22.87”	99°47’31.93”	19.3	114.2	0.07	75.4	586.0
6	23°53’28.43”	99°47’29.10”	15.8	114.2	0.01	65.3	523.0
7	23°53’31.02”	99°47’25.82”	13.6	111.1	0.01	69.8	247.0
8	23°53’31.20”	99°47’27.49”	14.8	109.8	0.04	50.4	256.0

Estructuras espaciales en las comunidades arbóreas y poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*

En promedio los árboles de las comunidades arbóreas y poblaciones de *Picea mexicana* y *Picea martinezii* se distribuyen aleatoriamente con una tendencia al agrupamiento (CE < 1, $\overline{W}$ > 0.50) en el espacio (Cuadro 7.13 y 7.14). Sin embargo, los árboles de *Picea mexicana* de El Coahuilón tuvieron la estructura espacial más extrema en forma de un clúster (CE = 0.37, $\overline{W}$ = 0.55) (Cuadro 7.14).

Cuadro 7.13 Estructura espacial de todos los árboles con diámetro normal ≥ 7 cm en cada comunidad arbórea de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*, evaluada por medio del Índice Clark-Evans (CE) y del índice de uniformidad de ángulos ($\overline{W}$), max = máximo, prom = promedio, DE = desviación estándar, min = mínimo.

		CE				$\overline{W}$			
	Comunidad	max.	prom.	DE	min.	max.	prom.	DE	min.
Picea mexicana	El Coahuilón	0.751	0.609	0.111	0.419	0.593	0.571	0.019	0.543
	El Mohinora	0.895	0.754	0.123	0.521	0.583	0.515	0.036	0.478
	La Marta	0.857	0.755	0.069	0.661	0.559	0.529	0.019	0.506
	promedio	0.834	0.706	0.101	0.534	0.578	0.538	0.025	0.509
Picea martinezii	Agua de Alardín	0.888	0.801	0.066	0.731	0.578	0.503	0.042	0.456
	Agua Fría	0.925	0.794	0.131	0.530	0.563	0.520	0.031	0.471
	El Butano	0.901	0.751	0.076	0.662	0.508	0.475	0.015	0.458
	La Encantada	0.860	0.738	0.089	0.561	0.543	0.512	0.019	0.485
	promedio	0.893	0.771	0.090	0.621	0.548	0.502	0.027	0.468

Cuadro 7.14 Estructura espacial de todos los árboles con un diámetro normal ≥ 7 cm en las poblaciones (árboles) de *Picea mexicana* y *Picea martinezii*, evaluada por medio del Índice Clark-Evans (CE) y del índice de uniformidad de ángulos ($\overline{W}$), max = máximo, prom = promedio, DE = desviación estándar, min = mínimo.

		CE				$\overline{W}$			
	Poblaciones	max.	prom.	DE	min.	max.	prom.	DE	min.
Picea mexicana	El Coahuilón	0.475	0.372	0.103	0.212	0.601	0.548	0.044	0.500
	El Mohinora	0.926	0.748	0.147	0.524	0.573	0.508	0.041	0.449
	La Marta	0.853	0.752	0.086	0.626	0.536	0.493	0.033	0.450
	promedio	0.751	0.624	0.112	0.454	0.570	0.516	0.039	0.466
Picea martinezii	Agua de Alardín	1.266	0.869	0.228	0.597	0.526	0.389	0.121	0.250
	Agua Fría	0.906	0.669	0.156	0.381	0.573	0.473	0.106	0.250
	Butano	1.200	0.951	0.176	0.626	1.000	0.511	0.252	0.250
	La Encantada	0.847	0.686	0.137	0.445	0.606	0.498	0.065	0.366
	promedio	1.055	0.794	0.174	0.512	0.726	0.494	0.141	0.289

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Las comunidades arbóreas de *Picea martinezii* y *P. mexicana* (con áreas basales de 27.9 y 26.1 m^2 por hectárea en promedio) son más densas que la comunidades arbóreas de *Picea chihuahuana* (con 19.6 m^2 por hectárea en promedio, DAP ≥ 7 cm) (Wehenkel *et al*., 2015) y que los bosques típicos de pino y encino en la Sierra Madre Occidental (con 19.8 m^2 por hectárea en promedio, DAP ≥ 1 cm) (Maciel-Nájera *et al*., 2020) (Tablas 2 y 4). Igual que *P. chihuahuana* (con 7.7 m^2 por hectárea en promedio) (Wehenkel *et al*., 2015), las dos piceas del estudio son especies que habitan en comunidades arbóreas mixtas, en las que nunca son dominantes (Tablas 3 y 5). En promedio los árboles de las comunidades y poblaciones de *P. martinezii* y *P. mexicana* están distribuidos aleatoriamente, con una tendencia al agrupamiento espacial (Tabla 13 y 14) similar a lo reportado por Wehenkel *et al*., (2015) sobre *Picea chihuahuana*. Se encontraron muy pocos cambios en las parcelas de monitoreo a un año de establecidas. Por lo tanto, recomendamos realizar otro inventario al cabo de 5 a 10 años para describir la dinámica temporal de estas poblaciones. Concluimos que, comprender en forma satisfactoria la estructura espacial de los bosques es esencial para contribuir a la conservación sostenible de estos recursos; en particular en estos bosques mixtos únicos e irregulares (Pommerening, 2006).

REFERENCIAS

Capo-Arteaga, M., S. Valencia-Manzo, C. Flores-Lopez y S. Braham-Sabag. 1997. Informe final de actividades del proyecto: Autoecología del género Picea en Nuevo Leon. Presentado a: Consejo Consultivo Estatal para la Preservacion y Fomento de la Flora y Fauna Silvestre de Nuevo León. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. 160 p.

Clark, P.J. and F.C. Evans. 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. Ecology 35: 445-453.

Condit, R., P.S. Ashton, P. Baker, S. Bunyavejchewin, S. Gunatilleke, N. Gunatilleke, S.P. Hubbell *et al.,* 2000. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. Science 288(5470): 1414-1418.

Domínguez-Guerrero, I. K., S. Mariscal-Lucer, J. C. Hernández-Díaz, B. Heinze, J.A. Prieto-Ruiz and C. Wehenkel. 2017. Discrimination of *Picea chihuahuana* Martinez populations on the basis of numerous dendrometric, climatic and edaphic traits and genetic diversity. PeerJ Preprints 5:e2677v1. https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.2677v1

Ehrlén, J. and W.F. Morris. 2015. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change. *Ecology Letters* 18, no. 3: 303-314.

Gadow, K.v., G.Y. Hui and M. Albert. 1998. Das Winkelmass ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. Centralbl. ges. Forstwesen 115: 1-9.

Gadow, K.v., C.Y. Zhang, C. Wehenkel, A. Pommerening, J.J. Corral-Rivas, M. Korol, S. Myklush, G.Y. Hui, A. Kiviste and X.H. Zhao. 2012. Forest Structure and Diversity, Chapter 2, In: Pukkala T. and K.v. Gadow (editors). *Continuous Cover Forestry*. Book Series Managing Forest Ecosystems 23, Springer Science+Business Media B.V. p. 29-83.

Guntis, B., E. Didzis, L. Ligita, L. Iluta, T. Guntis, T. Didzis. 2005. Age and spatial structure of natural *Pinus sylvestris* stands in Latvia. Scandinavian Journal of Forest Research 20: 471-480.

Kenkel, N. C., J. A. Hoskins, W. D. Hoskins. 1989. Local competition in a naturally established jack pine stand. Canadian Journal of Botany 67: 2630-2635.

Kuuluvainen, T. and T. Pukkala. 1987. Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade. Agricultural and Forest Meteorology 40: 215-231.

Ledig, F.T., M. Mapula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López and M.A. Capó-Arteaga. 2000a. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. Madroño 47:71-88.

Ledig, F.T., B. Bermejo V., P.D. Hodgskiss, D.R. Johnson, C. Flores-López and V. Jacob. 2000b. The mating system and genic diversity in Martinez spruce, an extremely rare endemic of Mexico's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. Canadian Journal of Forest Research 30 (9): 1156-1164.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes. 2002. Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. Conservation Genetics 3 (2): 113-122.

Ledig, F.T., P.D. Hodgskiss, K. U. Krutovskii, D. B. Neale and T. Eguiluz-Piedra. 2004. Relationships among the Spruces (*Picea,* Pinaceae) at Southwestern North America. Systematic Botany 29(2): 275-295.

Li, L., Z. L. Huang, W. H. Ye, H. L. Cao, S. G. Wei, Z. G. Wang, J. Y. Lian, Y. F. Sun, K. P. Ma, F. L. He. 2009. Spatial distributions of tree species in a subtropical forest of China. Oikos 118(4): 495-502.

Maciel-Nájera, J.F., Hernández-Velasco, J., González-Elizondo, M.S., Hernández-Díaz, J.C., López-Sánchez, C.A., Antúnez, P., Bailón-Soto, C.E. and Wehenkel, C., 2020. Unexpected spatial patterns of natural regeneration in typical uneven-aged mixed pine-oak forests in the Sierra Madre Occidental, Mexico. Global Ecology and Conservation 23: e01074.

Miller, T.E. and J. Weiner. 1989. Local density variation may mimic effects of asymmetric competition on plant size variability. Ecology 70: 1188-1191.

Moeur, M. 1993. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. Forest Science 39: 756-775.

Newton, P.F. and P.A. Jolliffe. 1998. Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands. Canadian Journal of Forest Research 28: 259-275.

Pommerening, A. 2006. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis. Forest Ecology and Management 224(3): 266-277.

Pommerening, A., D. Stoyan. 2006. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. Canadian Journal of Forest Research 36(7): 1723-1739.

Pretzsch, H. 1995. Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandszuwachs. Allg Forst Jagdztg 166: 190-201.

Spies, T.A. 1998. Forest Structure: A Key to the Ecosystem. Northwest Science 72(2): 34-39.

Thuiller, W., A. Cecile, B. Miguel. P.M. Araujo, M. Berry, M. Cabeza, A. Guisan, T. Hickler *et al.,* 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 9(3-4): 137-152.

Valdez, T.V., R. Foroughbakhch y G. Alanís. 2003. Distribución relictual del bosque mesófilo de montaña en el noreste de México. Ciencia UANL 6(3): 360-365.

Wehenkel, C., J.J. Corral-Rivas, J.C. Hernández-Díaz and K.v. Gadow. 2011. Estimating Balanced Structure Areas in multi-species forests on the Sierra Madre Occidental, Mexico. Annals of Forest Science 68: 385-394.

Wehenkel, C., J.M. Brazão-Protázio, A. Carrillo-Parra, J.H. Martínez-Guerrero and F. Crecente-Campo. 2015. Spatial Distribution Patterns in the Very Rare and Species-Rich *Picea chihuahuana* Tree Community (Mexico). PLoS ONE 10(10): e0140442. doi:10.1371/journal.pone.0140442

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS DEL INCREMENTO CORRIENTE ANUAL Y DEL INCREMENTO MEDIO ANUAL EN SIETE POBLACIONES DE *Picea*

J. Ciro Hernández Díaz[1*], Óscar Alfredo Díaz Carrillo[2], José Villanueva Díaz[3], Christian Wehenkel[1]

[1] Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[2] Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México
[3] CENID-RASPA, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Gómez Palacio, Durango, México
*Autor de correspondencia: J. Ciro Hernández, jciroh@ujed.mx

RESUMEN

En el presente capítulo se analiza el crecimiento en radio de los árboles de *Picea martinezii* (cuatro poblaciones) y *Picea mexicana* (tres poblaciones). Para ello se seleccionó una pre-muestra de 10 árboles por población, a los cuales se les extrajo un núcleo de crecimiento a la altura del pecho (1.30 m) y desde la periferia hasta el centro, utilizando un taladro de Pressler. A partir de los anillos de crecimiento detectados en dicho núcleo se midió el crecimiento acumulado en radio y se estimaron el ICA (incremento corriente anual, micras) y el IMA (incremento medio anual, micras) respectivos. El objetivo fue visualizar si el crecimiento acumulado se asemeja o no a una curva o modelo de tipo sigmoidal.

INTRODUCCIÓN

Un supuesto ampliamente aceptado en el medio forestal, que además se ha comprobado en diferentes trabajos, es que el desarrollo de los árboles individuales, lo mismo que los grupos de árboles (como los rodales), en los bosques regulares y también en los irregulares, puede modelarse a través de una curva de tipo sigmoidal, por ejemplo: Schumacher, Chapman Richards, Logístico, Gompertz, Log Normal, Von Bertalanffy, Hossfeld, Monomolecular, Korf, Weibull, Sloboda, Levakovick, Schumacher, entre otros (Domínguez-Calleros *et al.,* 2017).

En general, se reconoce que el desarrollo y producción de madera en un árbol o un rodal sigue una función de producción que gráficamente se aprecia como una S extendida (curva sigmoidea o sigmoidal). Esa curva puede representar a las existencias reales totales (ERT, m^3/ha) acumuladas a través de la edad del árbol o del rodal, y se calcula a partir del inventario que se realiza con fines de administrar el aprovechamiento de los recursos forestales (Figura 8.1).

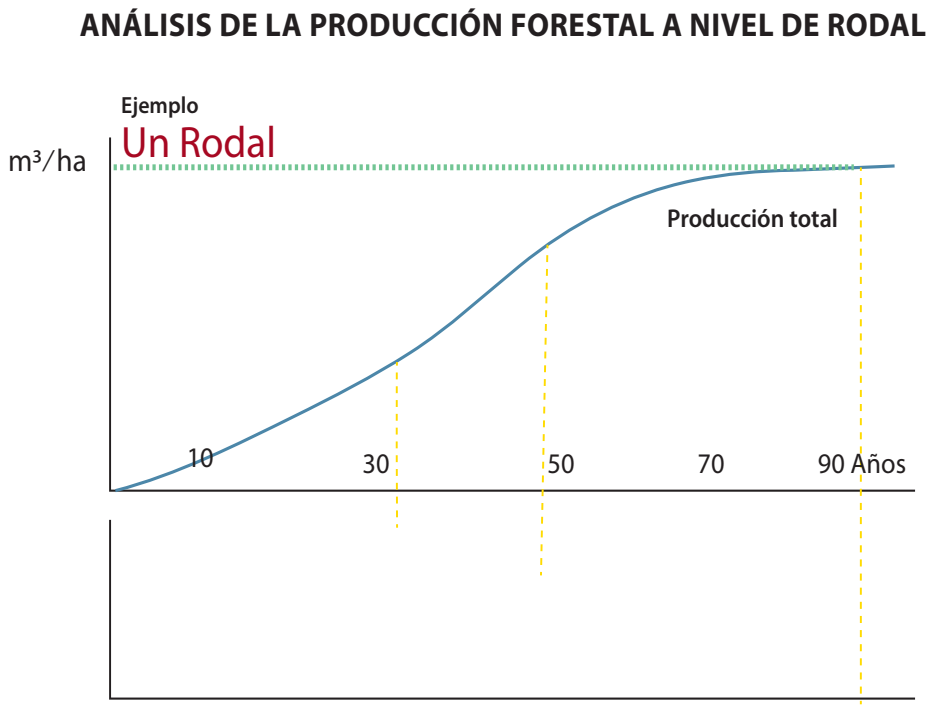


Figura 8.1 Comportamiento sigmoidal típico del crecimiento acumulado de un rodal. Fuente: Hernández (2017).

Dicha curva presenta algunos puntos que facilitan analizar varios aspectos importantes en la silvicultura, por ejemplo, a nivel de rodal esos puntos son:

1) El **punto de origen**, que indica que en algún momento no había ningún volumen de madera por hectárea en ese rodal, como puede suceder después de un incendio, plaga, ciclón etc., o después de una corta a matarrasa.

2) El **punto de inflexión**, donde deja de aumentar la tasa de crecimiento del rodal.

3) El **punto máximo de tangencia**. Que es aquel donde una línea recta (rayo) que se traza desde el origen toca por última vez a esa misma curva sigmoidal de crecimiento acumulado.

4) El **punto inicial donde la curva se vuelve asintótica** (paralela al eje de las abscisas) que corresponde al inicio del período de tiempo donde el volumen del rodal deja de incrementar.

Esos cuatro puntos facilitan explicar gráficamente lo que sucede con el incremento de las ERT a través del tiempo de desarrollo del rodal (Figura 8.2). Hernández-Díaz (2017) describe a detalle el comportamiento del incremento corriente anual (ICA) y del incremento medio anual (IMA), suponiendo que la curva de ERT se ajusta a un modelo sigmoidal. Textualmente este autor describe lo siguiente:

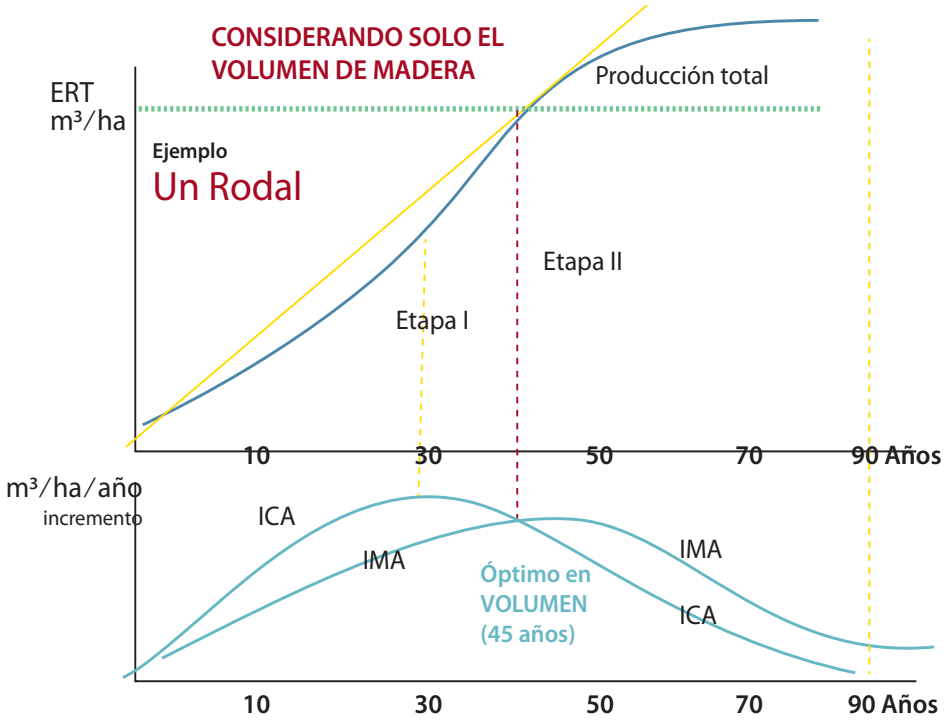


Figura 8.2 Relación entre la curva de producción total (ERT) y las curvas del incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA). Fuente: Hernández (2017).

*"En el **origen** (año cero) inicia el crecimiento del arbolado (en el bosque o el rodal).*

*El **punto de inflexión** ocurre en la edad (por ejemplo 28 años) donde alcanza su **máximo** valor la tasa de crecimiento de las ERT, conocidas como **ICA** (incremento corriente anual).*

*El punto de **máxima tangencia** ocurre en la edad (por ejemplo 45 años) donde alcanza su **máximo valor el IMA** (incremento medio anual). **En esta edad, el ICA y el IMA son iguales** (se cruzan), definiendo lo que llamamos "**turno absoluto**", si es que consideramos únicamente el volumen de madera sin incluir el valor monetario de la misma. **Antes del turno el ICA es siempre superior al IMA** mientras que **después del turno el IMA es***

mayor que el ICA.

El ***punto inicial donde la curva se vuelve asintótica,*** *es la edad donde el* ***ICA se vuelve cero*** *(por ejemplo 90 años) y seguirá siendo cero en años posteriores, si es que la curva de ERT se mantiene asintótica. En cambio, el IMA, mientras existan árboles en el rodal, siempre es mayor que cero".*

Con base en lo anterior y como una parte de las metas propuestas en el proyecto titulado "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática", en este informe se presentan los resultados del análisis del crecimiento en diámetro en las poblaciones naturales pre-muestreadas de estas dos especies que se encuentran amenazadas. Esta información permitirá obtener algunas bases para conocer la rapidez con la que crecen en estas poblaciones, así como una evaluación inicial para visualizar si el comportamiento del IMA y el ICA en el diámetro de estas especies es acorde con la hipótesis de un modelo de crecimiento sigmoidal.

MÉTODOS

El trámite para acceder a los sitios de estudio consistió en principio en contactar a los propietarios de los predios donde se ubican las poblaciones de *Picea* analizadas y obtener su anuencia para visitar los sitios con presencia de las especies consideradas y realizar estudios sobre el proyecto arriba mencionado. En los predios, se realizaron varios pre-muestreos para generar información preliminar y de utilidad para complementar posteriormente con una mayor intensidad de muestreo la información preliminar del estudio. Para el pre-muestreo se seleccionaron 10 árboles por población, en cuatro poblaciones de *Picea martinezii* (La Encantada, El Butano, Agua de Alardín[9] y Agua Fría) y tres poblaciones de *Picea mexicana* (El Mohinora, El Coahuilón y La Marta). En esos árboles, se obtuvieron a la altura del pecho (1.30 m), núcleos de crecimiento con taladro de Pressler, en un radio desde la corteza hasta el centro del fuste para incluir el anillo de crecimiento más interno. Los anillos de crecimiento conformados por madera temprana y tardía se midieron en micras. Con esta información, se integró la base de datos de cada población, a partir de la cual, se estimó la edad de cada árbol muestreado, así como su crecimiento acumulado en radio, ICA e IMA, con base en el siguiente procedimiento:

1. El ICA y el IMA se calcularon para cada espécimen muestreado, procedimiento que se realizó año por año a lo largo de la vida de cada árbol muestreado, en las que se determinó la edad en la que ocurrió el valor máximo de estas dos variables, lo cual pertmitió identificar cuál de estos máximos ocurrió a una edad más temprana.

2. Se estimaron los promedios de ICA e IMA en cada población, tomando como período de referencia la edad del árbol más joven, que corresponde al periodo

[9] Registrada en algunos trabajos como Agua Lardín.

más largo en el cual se podían incluir en el promedio los 10 árboles muestreados por población.

3. Suponiendo que la gráfica del crecimiento acumulado sigue una forma sigmoidal, el ICA promedio máximo de los 10 árboles muestreados debería suceder antes que el IMA promedio máximo.

4. Se supuso también que todos los árboles alcanzaron 1.3 m de altura a la edad de cinco años y que, por lo tanto, a esta edad se registró el primer anillo de crecimiento (a partir de centro del árbol).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 8.1 se presenta el resumen del ICA y el IMA alcanzado por cada árbol muestreado en cada población de *Picea martinezii*. En el Cuadro 8.2 se presenta un resumen similar, pero referido a las poblaciones de *Picea mexicana*. También se presentan los ICA e IMA máximos y las edades a las que ocurrieron estos valores en cada uno de los 10 árboles muestreados por población.

Análisis del crecimiento radial en una población de *Picea martinezii*

Para facilitar el análisis, en este apartado se examina primero lo referente a una sola población (La Encantada). Es importante aclarar que los promedios (última columna dell Cuadro 8.1) se refieren solo al período de tiempo equivalente a la edad del árbol más joven por población. Por lo tanto, a nivel de cada árbol las edades de máximo ICA e IMA pueden estar fuera de ese periodo, ya que se enmarcan en la edad total de cada árbol por separado. En La Encantada, el más joven fue el árbol 4 y se estableció en 1966, por lo cual para el 2019 tenía 53 años de edad. Para cada año en este periodo se calculó el ICA y el IMA en referencia al radio de este árbol (representado por el núcleo de crecimiento) y se observó que el ICA en radio alcanzó su máximo a la edad de 20 años, con un valor de 3,805 micras (3.8 mm/año), indicado por el ancho total del anillo de crecimiento correspondiente a ese año, mientras que el IMA máximo en cuanto al radio del árbol alcanzó su máximo a la edad de 27 años, con un valor de 2,233 micras (2.2 mm/año).

El hecho de que el ICA máximo ocurra a una edad menor que el IMA máximo respalda la hipótesis de que el crecimiento acumulado del árbol (en este caso el radio del árbol 4), se podría explicar con un modelo que gráficamente tendría forma sigmoidal (Figuras 8.1 y 8.2).

El mismo análisis descrito para el árbol 4, se hizo para los otros nueve árboles de La Encantada, tomando como periodo de análisis la edad respectiva de cada árbol muestreado. En este análisis se esperaba que todos los árboles siguieran un patrón de crecimiento similar (tipo sigmoidal) a través de su vida, aunque cada árbol haya nacido en años muy diferentes; por ejemplo, el árbol más viejo se estableció en 1842 (Cuadro 8.1) y en 2019 tenía 177 años.

En el árbol 3 de La Encantada, el ICA máximo se observó a los 51 años de edad, mientras que el IMA máximo se presentó a los 10 años. Este comportamiento en el crecimiento del radio del árbol 3, contradice la hipótesis de crecimiento sigmoidal y es un indicativo de que aun en la misma población puede haber otros árboles cuyo patrón de crecimiento tampoco respalda esta hipótesis. Sin embargo, dado que nueve de los 10 árboles muestreados en La Encantada muestran un patrón de crecimiento donde el ICA máximo ocurre antes que el IMA máximo, es posible aseverar que, en promedio, en esta población el crecimiento podría explicarse a través de un modelo sigmoidal.

***Picea martinezii:* Crecimiento acumulado, ICA e IMA en las cuatro poblaciones**

En el resumen que se presenta en el Cuadro 8.1, se observa que en la mayoría de los árboles de las cuatro poblaciones el ICA máximo ocurre antes que el IMA máximo, lo cual es congruente con el modelo sigmoidal que se atribuye al crecimiento del arbolado. Sin embargo, en dicho Cuadro 8.1 se resaltaron en color aquellas celdas que en cada población analizada corresponden a los casos "excepcionales" de árboles donde el IMA máximo se presentó antes que el ICA máximo, contradiciendo al supuesto de crecimiento sigmoidal.

El análisis individual de cada población sería similar a lo ya descrito para La Encantada, con la salvedad de que el árbol más joven tiene una edad diferente en cada población y, por lo tanto, el periodo analizado en cada caso es distinto. En El Butano, el periodo de análisis fue de 63 años; en Agua de Alardín 47 años, mientras que en Agua Fría fue de 46 años.

Hay que observar que, ya que en cada población se analizaron solo los primeros años de vida de cada árbol muestreado (equivalentes a la edad del árbol más joven respectivo), era de esperarse que el ICA máximo e IMA máximo ocurrieran, respectivamente, a edades similares entre árboles, al menos dentro de cada población, donde puede asumirse que las características climáticas y fisiográficas son también similares. Sin embargo, no fue así; en La Encantada el ICA máximo se alcanzó a los 7 años de edad en el árbol 6 y solo hasta los 172 años de edad en el árbol 1, mientras que en los otros ocho árboles las edades de ICA máximo fueron muy diversas entre esos dos extremos. En cuanto a las edades del IMA máximo también se presenta esa gran disparidad de edades entre los 10 árboles muestreados en La Encantada y, en las otras poblaciones de *P. martinezii* la situación fue similar.

Esa disparidad de edades donde ocurren los valores máximos de ICA e IMA puede haber sido ocasionada por diversos factores, como el clima (temperatura, precipitación, humedad, heladas, etc.), la fisiografía (pendiente, exposición, tipo de suelos), aspectos ecológicos (dominancia, composición, competencia, etc.) o inclusive genéticos de cada individuo muestreado. En particular, la edad de algunos árboles es apenas superior a 40 años (se establecieron en la década de los 1970s, árbol 2 de Agua Fría), mientras que el árbol más viejo tiene casi 240 años (se estableció en 1780, árbol 10 de El Butano).

El hecho de que el establecimiento de los individuos ocurriera en años muy diferentes es un indicativo sólido para argumentar que cada árbol puedo haber estado sometido a factores ambientales muy distintos en cuanto a su naturaleza e intensidad a través de

sus respectivos primeros años de vida, ocasionando que el desarrollo también fuera muy diferente entre árboles. Sin embargo, a pesar de que este fue solo un pre-muestreo, y por lo tanto muy reducido en cada población (10 árboles) puede observarse que, en promedio, se respalda la hipótesis del crecimiento sigmoidal. Cabe recordar que el objetivo de este pre-muestreo no fue el de calcular con precisión el comportamiento del ICA y el IMA, sino simplemente obtener algunos elementos preliminares para entender mejor el crecimiento del género *Picea* en las poblaciones estudiadas. Estudios más precisos de esta índole requieren incrementar el tamaño de muestra y fechar con precisión cada anillo de creciciemto anual, ya que es común en estas especies la presencia de anillos falsos y ausentes, que pueden distorsionar la interpreatción de estos parámetros.

Cuadro 8.1 Resumen de los 10 árboles muestreados por población de *Picea martinezii* en los sitios conocidos como La Encantada, El Butano, Agua de Alardín y Agua Fría. Se indica el año de nacimiento por árbol, el ICA y el IMA máximos (en micras/año) así como la edad en la que ocurren esos máximos en cada árbol muestreado y en promedio para los 10 árboles. Las cifras resaltadas en color indican los árboles donde el ICA máximo ocurre a una edad mayor que el IMA máximo, lo cual no respalda la hipótesis de crecimiento acorde a un modelo sigmoidal. NOTA: Para los promedios se tomó como período de referencia la edad del árbol más joven por población.

LA ENCANTADA	***Picea martinezii***										
	LE1	**LE2**	**LE3**	**LE4**	**LE5**	**LE6**	**LE7**	**LE8**	**LE9**	**LE10**	
NACIÓ (AÑO)	1842	1951	1936	1966	1952	1962	1923	1901	1955	1942	PROMEDIO
ICA MAX (micras)	4,227	5,134	5,909	3,805	3,590	5,166	5,511	5,159	3,773	6,963	2,417
Edad ICA Max (años)	172	41	51	20	35	7	56	86	33	47	6
IMA MAX (micras)	1,515	1,892	2,319	2,233	1,623	3,125	1,880	1,467	1,807	1,957	1,732
Edad IMA Max (años)	177	59	10	27	45	19	75	116	42	56	51

EL BUTANO	***Picea martinezii***										
	BUT1	**BUT2**	**BUT3**	**BUT4**	**BUT5**	**BUT6**	**BUT7**	**BUT8**	**BUT9**	**BUT10**	
NACIÓ (AÑO)	1941	1831	1881	1956	1882	1783	1912	1854	1832	1780	PROMEDIO
ICA MAX (micras)	2,772	1,507	1,778	2,903	2,063	1,388	2,108	6,688	4,118	4,495	2,104
Edad ICA Max (años)	55	162	93	17	100	212	77	137	155	6	6
IMA MAX (micras)	2,772	1,526	1,778	2,903	2,063	1,402	2,108	1,916	1,430	1,412	1,411
Edad IMA Max (años)	75	187	120	62	135	238	105	164	15	8	63

AGUA DE ALARDÍN	*Picea martinezii*										
	AA1	AA2	AA3	AA4	AA5	AA6	AA7	AA8	AA9	AA10	
NACIÓ (AÑO)	1972	1891	1888	1963	1840	1838	1858	1810	1871	1846	PROMEDIO
ICA MAX (micras)	5,102	4,119	5,878	5,119	3,205	7,207	4,549	3,365	5,063	3,442	3,365
Edad ICA Max (años)	16	107	126	6	159	155	153	197	7	15	6
IMA MAX (micras)	2,227	787	1,761	2,708	1,355	1,132	1,062	1,190	1,789	1,308	1,239
Edad IMA Max (años)	19	10	131	42	60	182	9	105	11	15	17

AGUA FRÍA	*Picea martinezii*										
	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	
NACIÓ (AÑO)	1885	1973	1969	1958	1799	1909	1966	1967	1883	1800	PROMEDIO
ICA MAX (micras)	7,133	7,949	6,988	7,839	2,141	6,480	4,775	6,575	5,817	7,587	2,824
Edad ICA Max (años)	102	41	21	43	8	86	6	35	109	193	6
IMA MAX (micras)	1,417	3,622	3,082	1,937	1,106	2,647	2,845	2,410	997	1,547	1,844
Edad IMA Max (años)	115	42	44	54	19	10	37	41	136	30	43

Picea mexicana: Crecimiento acumulado, ICA e IMA en las tres poblaciones

En el Cuadro 8.2 se resume el comportamiento del crecimiento acumulado en el radio de los árboles muestreados de *Picea mexicana* en sus tres poblaciones conocidas. En ese Cuadro, se observa que *P. mexicana* se comporta de manera similar a *P. martinezii* en cuanto al crecimiento acumulado en el radio y en cuanto a la posibilidad de que ese crecimiento obedezca a un modelo sigmoidal, respaldado por las edades donde el ICA y el IMA alcanzan sus respectivos valores máximos. En esta especie, el árbol muestreado más joven (árbol 8 en la población La Marta) se estableció en 1963, con una edad de 56 años en el 2019, mientras que el más longevo se estableció en 1864 (árbol 3 de El Coahuilón) con una edad de 155 años en 2019. También en *P. mexicana* las edades del ICA máximo y del IMA máximo fueron muy diversas entre los árboles muestra de cada población, lo cual puede deberse a las posibles causas ya descritas en el apartado anterior sobre *P. martinezii*.

Llama la atención que en varios de los árboles muestreados en las dos especies analizadas el ICA máximo se detectó a una edad demasiado temprana, como son de seis o siete años de edad. Ese máximo "aparente" suele disminuir en los años siguientes

y luego volver a repuntar en una o más ocasiones a lo largo de la vida de cada árbol individual, lo cual se asocia a la dinámica poblacional y a las condiciones ecológicas predominantes del sitio y en particular para cada árbol. Es por ello que, a nivel de cada árbol, es difícil observar un crecimiento acumulado claramente sigmoidal, el cual en cambio sí suele detectarse cuando se trata del promedio del crecimiento acumulado de un conjunto de árboles de la misma edad (rodales coetáneos).

En el caso del presente reporte, dicho crecimiento sigmoidal apenas fue posible detectarlo en cada población, debido al reducido tamaño de la pre-muestra aplicada y al hecho de que los árboles muestreados se establecieron en años muy distantes y, por lo tanto, se desarrollaron en condiciones ambientales probablemente muy diversas. En el Cuadro 8.2 también se observa que hubo excepciones que no respaldan la teoría del crecimiento sigmoidal en los árboles individuales de *P. mexicana*. En El Coahuilón fueron cuatro excepciones (marcadas con celdas en color); en cambio en La Marta, los crecimientos e incrementos en los 10 árboles de la muestra sí respaldan dicha teoría.

Análisis de los promedios de ICA e IMA máximos en ambas especies de *Picea*

Debe tenerse en cuenta que los promedios mostrados en la última columna de los cuadros 8.1 y 8.2, no corresponden a los promedios de los renglones de ICA e IMA máximos ni a los promedios de las edades en que estos valores máximos se presentan en los 10 árboles que aparecen en cada Cuadro; pues, como ya se explicó previamente, los valores máximos del ICA e IMA por árbol se buscaron y se reportaron con respecto a la edad total de cada árbol en forma individual. En cambio, el promedio reportado en la última columna de cada Cuadro se refiere solo al periodo de tiempo equivalente a la edad del árbol más joven en cada población, ya que de haber incluido periodos cada vez mayores implicarían dejar fuera del promedio a un mayor número de individuos.

En los promedios que se presentan en los cuadros 8.1 y 8.2, se observa que en todos los casos el ICA máximo ocurre a una edad más temprana que el IMA máximo, lo cual respalda que en promedio los árboles muestreados en cada población tienden a crecer siguiendo un modelo sigmoidal. Sin embargo, también se observa que el ICA máximo se registra a una edad demasiado temprana e ilógica (entre 5 y 7 años). Esto indica que para detectar promedios más realistas sería necesario realizar muestreos más completos, mejor distribuidos y más representativos para los cuales sería necesario contar con mayor presupuesto y realizar los trámites oficiales respectivos. Sin embargo, los datos obtenidos en este pre-muestreo exploratorio permiten apreciar de manera general los ritmos de crecimiento de los árboles de este género.

Análisis gráfico del crecimiento acumulado, el ICA y el IMA en cada población

En las figuras 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6 se ilustra el crecimiento acumulado, así como el comportamiento del ICA y el IMA a través del periodo de tiempo definido por la edad del árbol más joven de cada población analizada de *Picea martinezii*. En las figuras 8.7, 8.8

y 8.9 se muestra la misma información, pero referida a las tres poblaciones de *Picea mexicana* analizadas. Los datos de los 10 árboles de cada población que se incluyeron en los promedios mostrados en estas gráficas, corresponden a las mismas edades equivalentes de estos árboles, pero aclarando que se establecieron en años muy diferentes (ver Cuadros 8.1 y 8.2).

Cuadro 8.2 Resumen de los 10 árboles muestreados por población de *Picea mexicana* en los sitios conocidos como El Coahuilón, El Mohinora y La Marta. Se observa el año de nacimiento por árbol, el ICA y el IMA máximos (en micras) así como la edad en la que ocurren esos máximos en cada árbol muestreado y en promedio para los 10 árboles. Las cifras resaltadas en color indican los árboles donde el máximo ICA ocurre a una edad mayor que el máximo IMA, lo cual no respalda la hipótesis de crecimiento acorde a un modelo sigmoidal.

EL COAHUILÓN	***Picea mexicana***										
	EC1	**EC2**	**EC3**	**EC4**	**EC5**	**EC6**	**EC7**	**EC8**	**EC9**	**EC10**	
NACIÓ (AÑO)	1982	1958	1864	1809	1986	1899	1904	1907	1914	1893	**PROMEDIO**
ICA MAX (micras)	9,840	3,570	4,650	4,140	4,880	3,620	6,410	2,890	2,470	4,400	1680
Edad ICA Max (años)	18	131	118	170	24	111	5	94	96	6	7
IMA MAX (micras)	4,712	1,148	1,199	1,069	1,951	1,894	2,250	1,164	1,246	1,789	1679
Edad_IMA Max (años)	30	41	123	34	26	42	42	35	40	35	28

EL MOHINORA	***Picea mexicana***										
	EM1	**EM2**	**EM3**	**EM4**	**EM5**	**EM6**	**EM7**	**EM8**	**EM9**	**EM10**	
NACIÓ (AÑO)	1880	1906	1891	1885	1899	1891	1932	1936	1896	1891	**PROMEDIO**
ICA MAX (micras)	8,700	5,200	8,040	6,400	8,330	9,630	4,070	6,000	4,500	3,440	4890
Edad ICA Max (años)	6	79	5	5	98	5	55	62	6	6	5
IMA MAX (micras)	3,092	1,939	4,122	2,876	1,982	3,205	1,673	1,958	2,371	1,549	2140
Edad IMA Max (años)	18	19	17	14	114	17	65	77	16	23	16

LA MARTA	*Picea mexicana*										
	LM1	**LM2**	**LM3**	**LM4**	**LM5**	**LM6**	**LM7**	**LM8**	**LM9**	**LM10**	
NACIÓ (AÑO)	1891	1948	1907	1919	1883	1923	1948	1963	1934	1929	**PROMEDIO**
ICA MAX (micras)	8,553	4,583	4,615	4,891	8,110	3,629	5,613	5,906	4,816	4,615	3753
Edad ICA Max (años)	7	39	7	5	5	25	5	35	19	7	5
IMA MAX (micras)	3,524	1,874	2,755	2,514	3,188	2,130	2,075	2,851	2,751	2,212	2363
Edad IMA Max (años)	27	66	32	29	12	26	54	47	26	24	42

NOTA: Para los promedios se tomó como período de referencia la edad del árbol más joven por población. Con respecto a los rodales del Coahuilón y la Marta, la especie se ubica en parajes pobres en términos de profundidad de suelo, fertilidad y con más limitaciones en humedad, ya que la precipitación seguramente es inferior a los otros sitios; una situación que genera un pobre índice de sitio; esto se puede corroborar con las series dendrocronológicas y donde el grosor de los anillos anuales es menor. El tamaño de muestra utilizado con la información existente se puede mejorar para que los resultados sean más robustos estadísticamente.

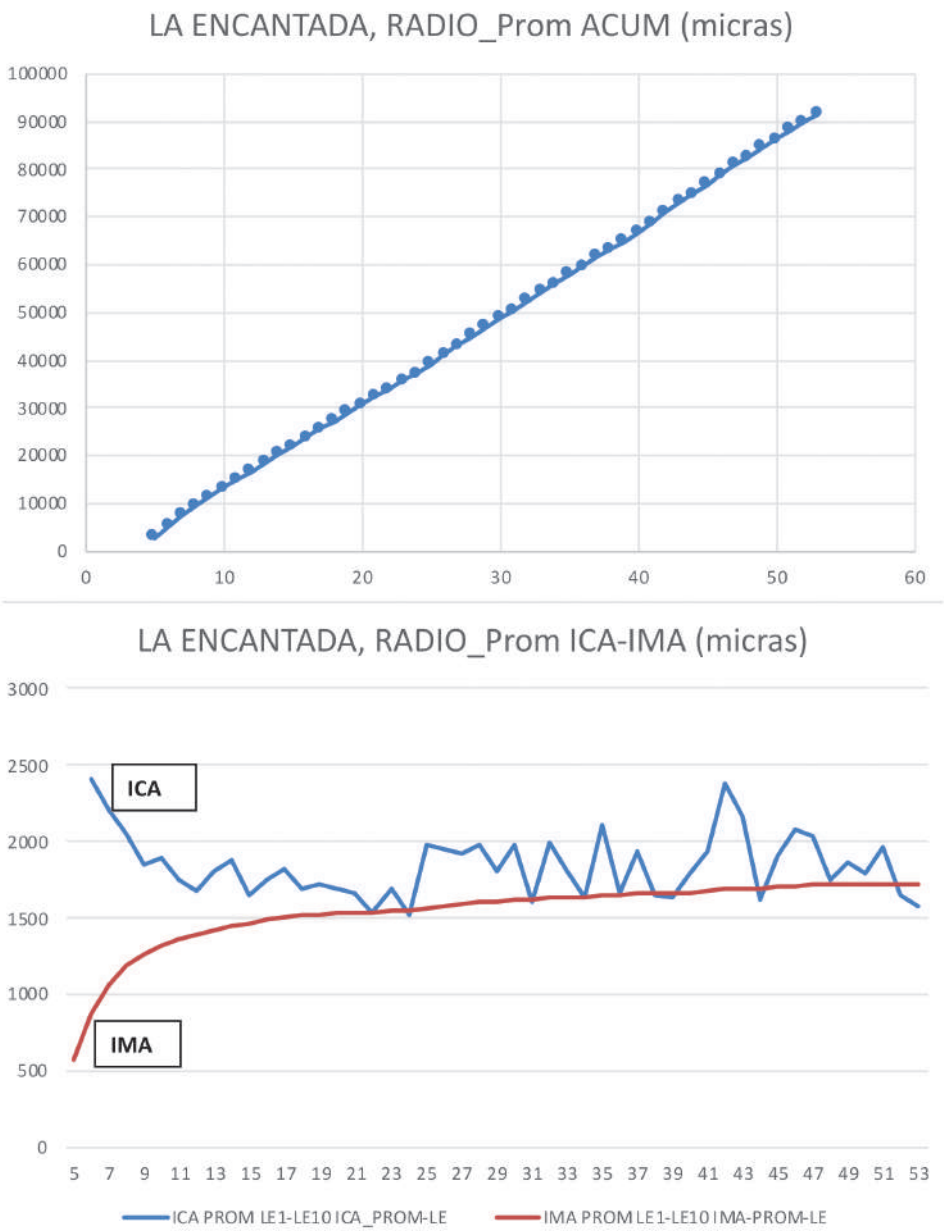


Figura 8.3 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea martinezii,* en el predio La Encantada. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.

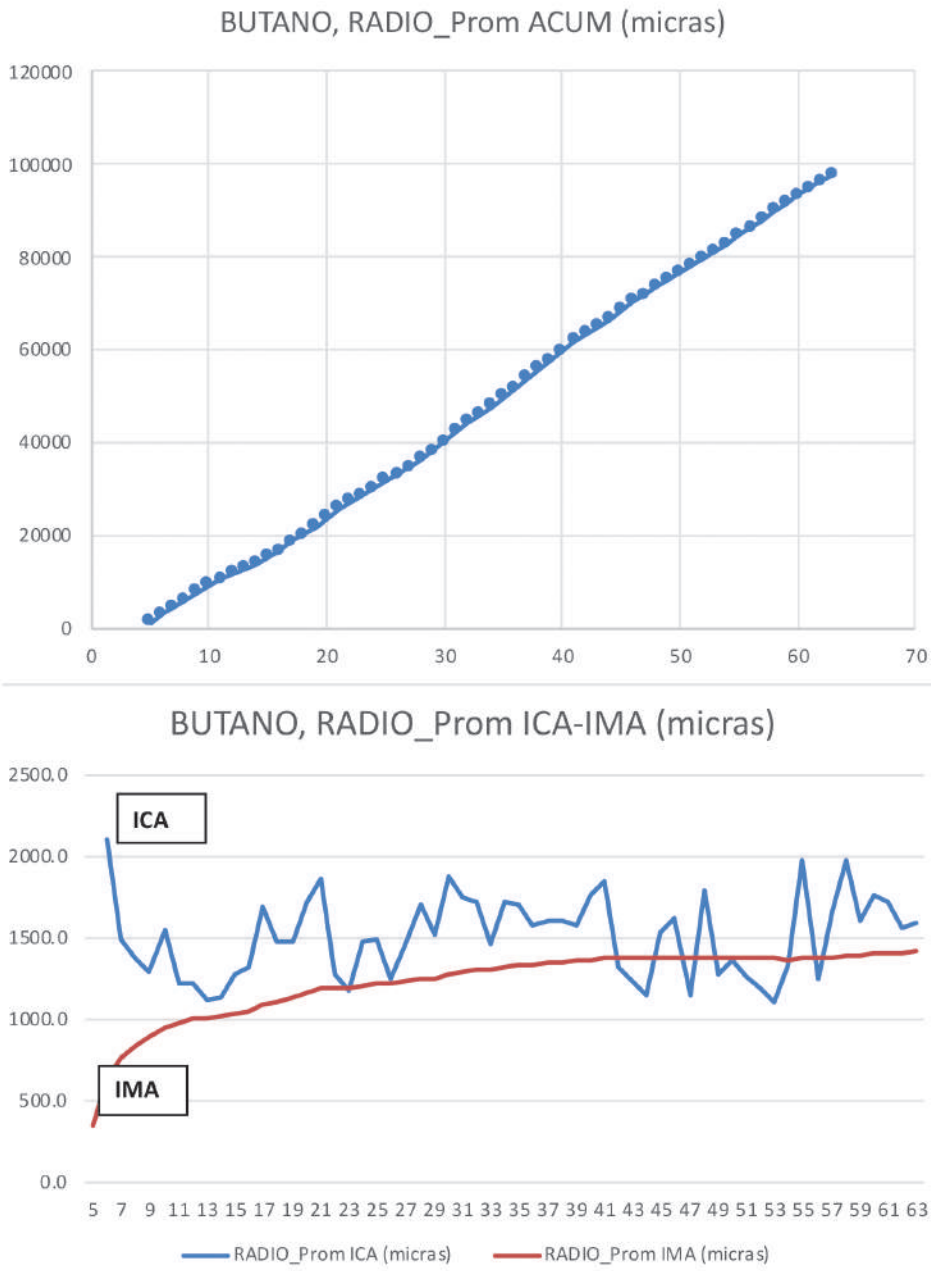
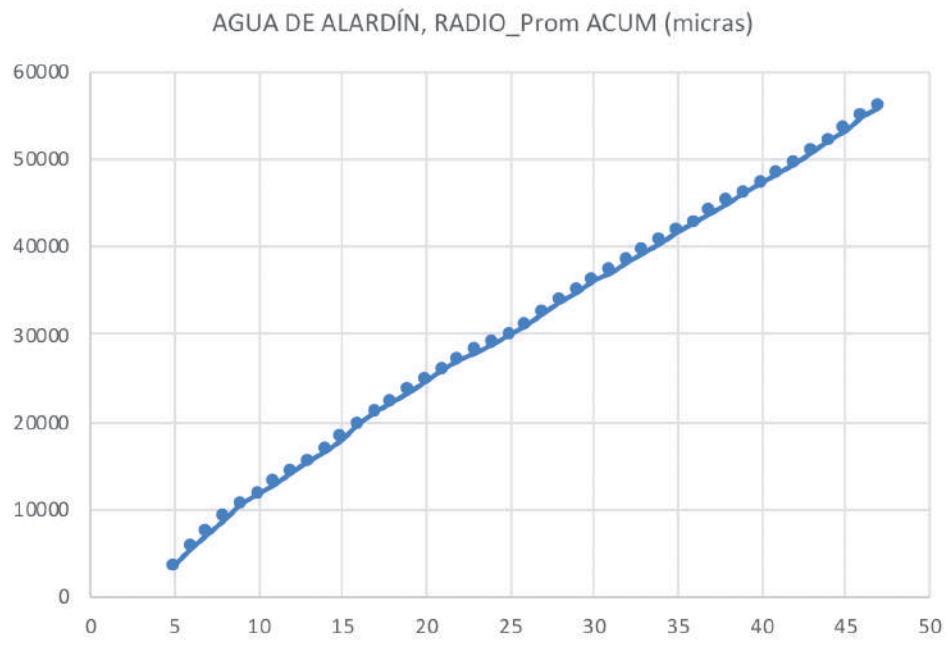


Figura 8.4 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea martinezii,* en el predio El Butano. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.



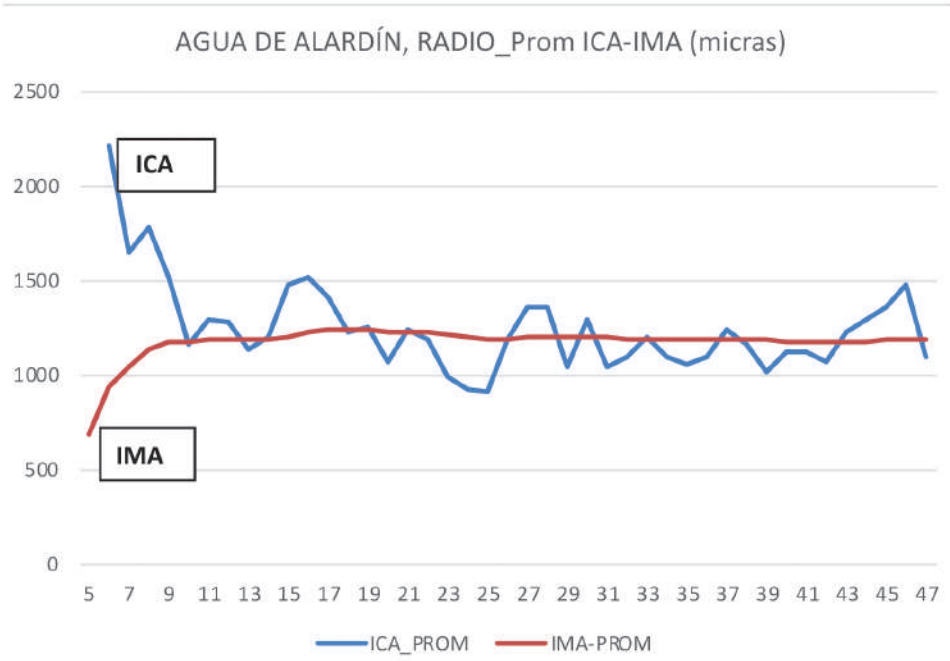


Figura 8.5 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea martinezii,* en el predio Agua de Alardín. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.

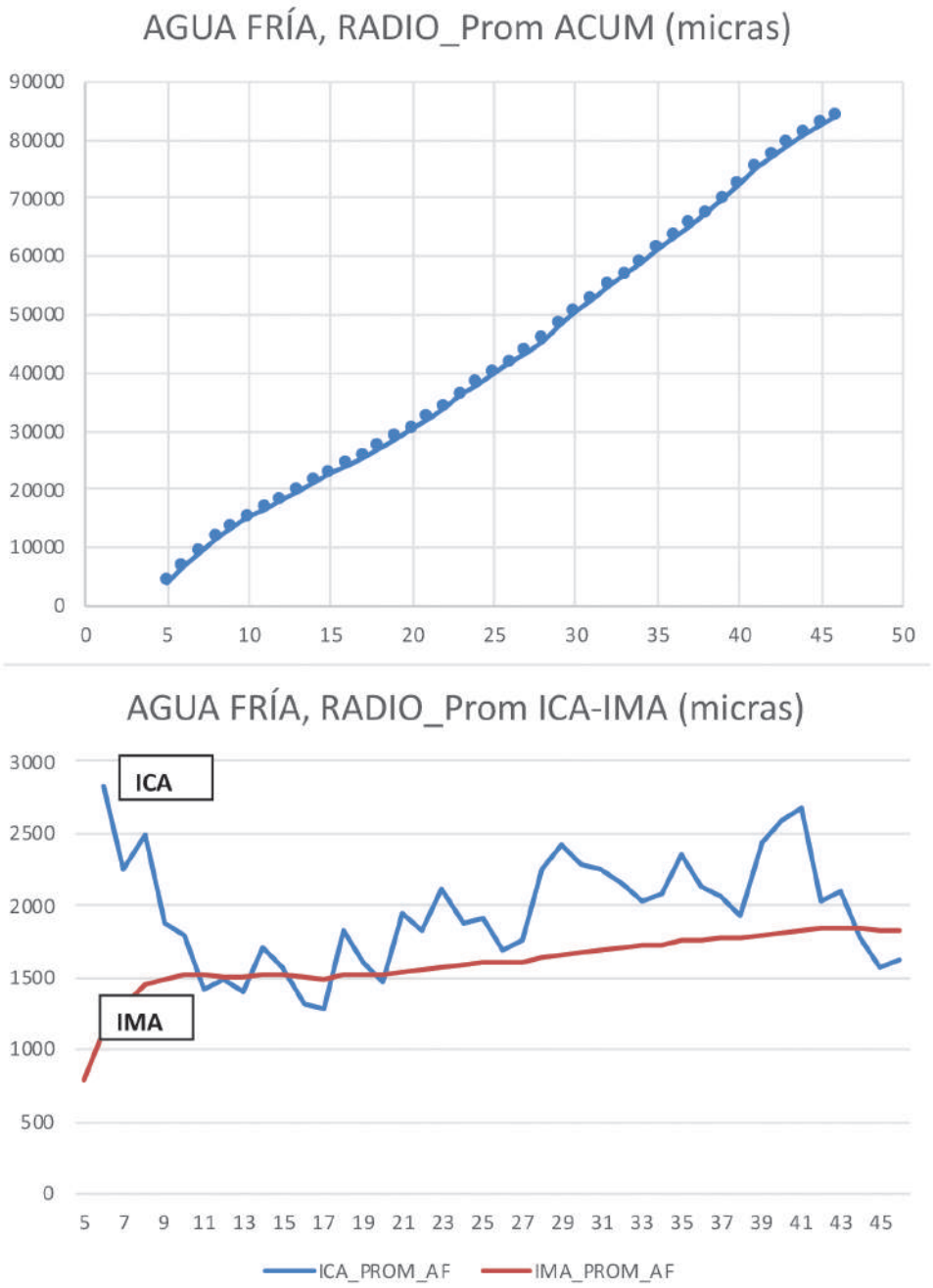
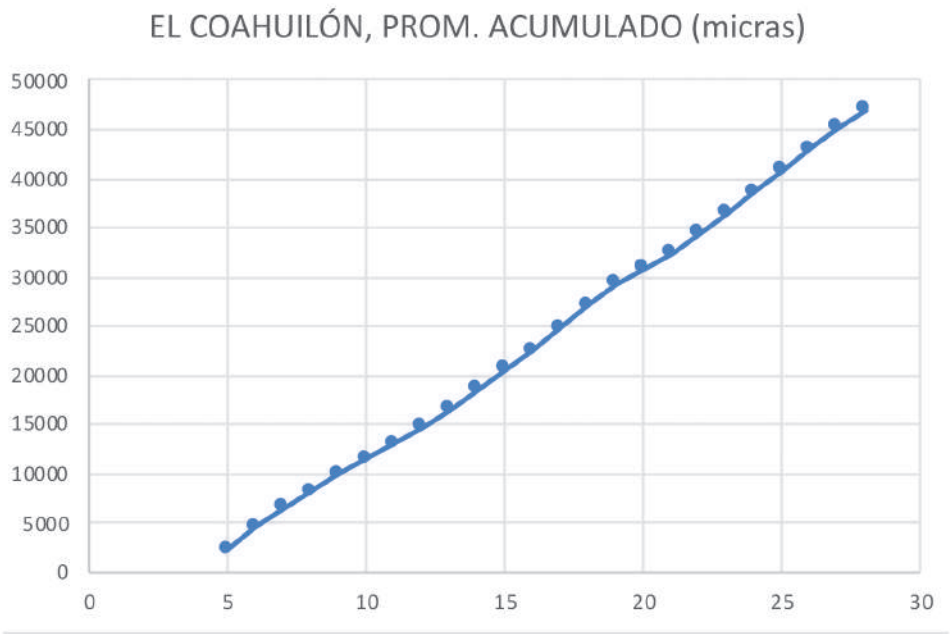


Figura 8.6 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea martinezii,* en el predio Agua Fría. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.



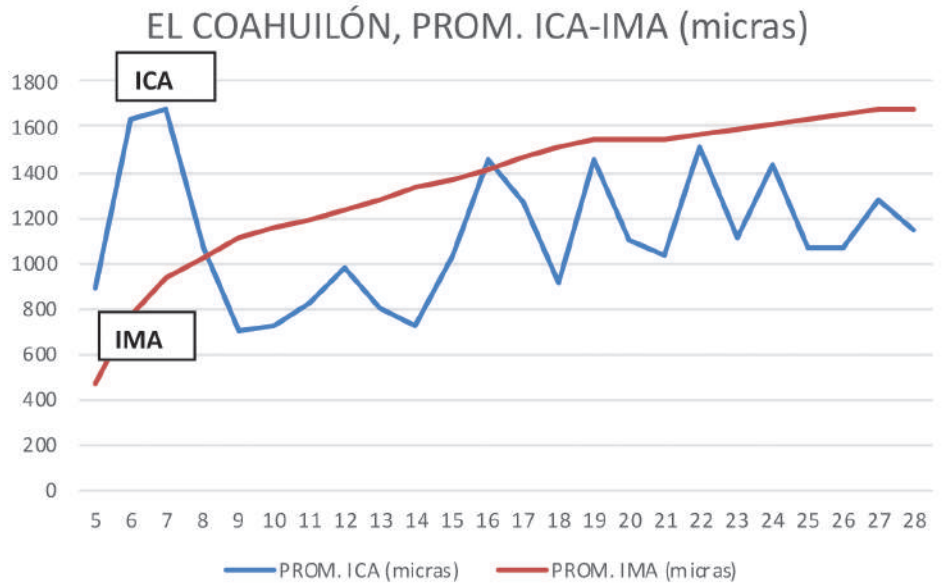


Figura 8.7 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea mexicana,* en el predio El Coahuilón. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.

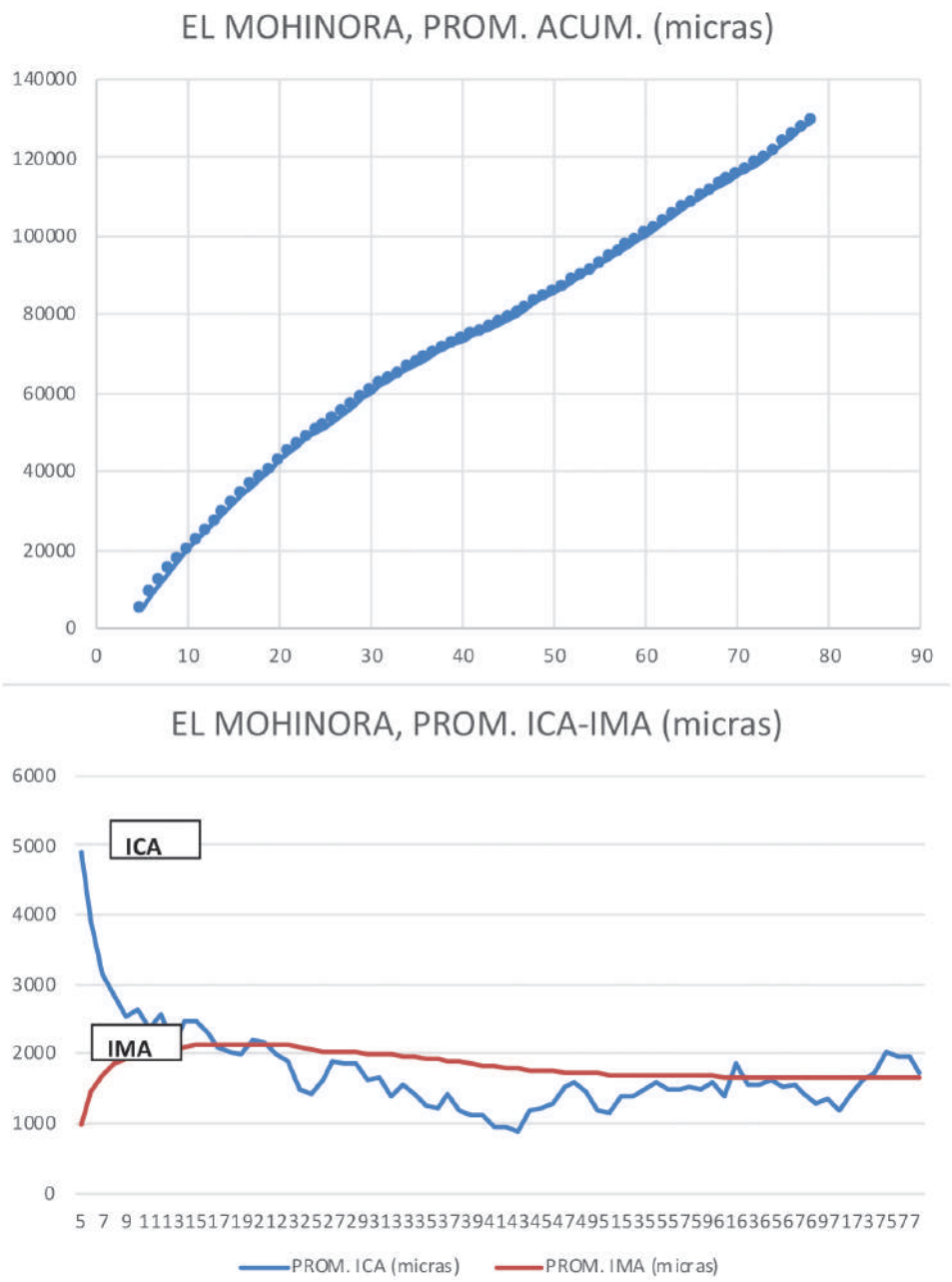


Figura 8.8 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea mexicana,* en el predio El Mohinora. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.

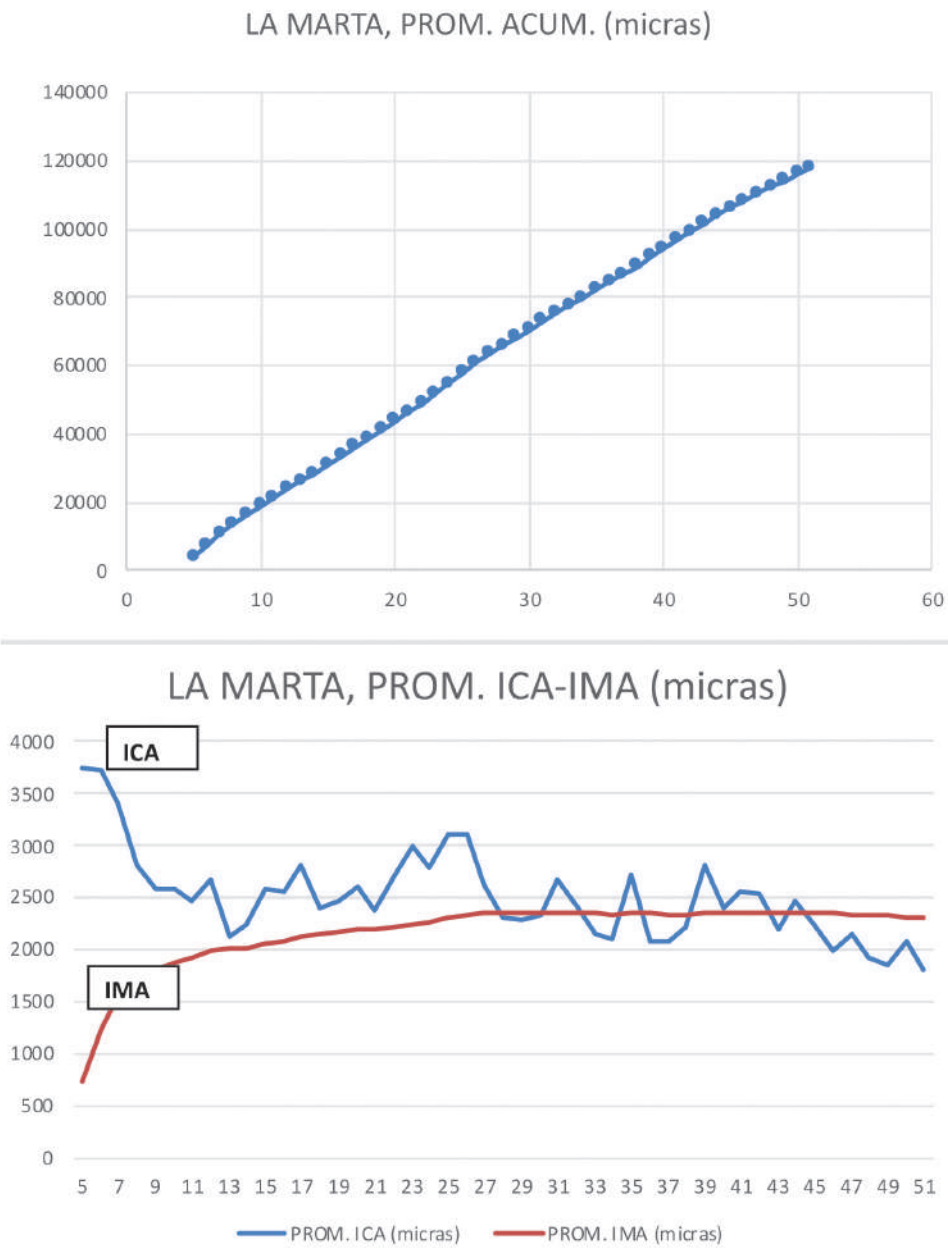


Figura 8.9 Crecimiento anual del radio normal (a 1.30 m) del fuste de 10 árboles de *Picea mexicana,* en el predio La Marta. Arriba: Crecimiento acumulado; Abajo: ICA e IMA con respecto a dicho crecimiento acumulado.

El hecho de incluir árboles de la misma edad para obtener los promedios, fue con la intención de simular coetaneidad en el "grupo" de los 10 árboles muestra y con ello, se tenía la expectativa de que las curvas de crecimiento acumulado, así como las del ICA y el IMA tomarían un aspecto similar a las curvas descritas en las figuras 8.1 y 8.2, al menos en el intervalo de años graficado, que en algunos casos puede considerarse que es corto, dada la reducida edad del árbol más joven. Sin embargo, en las figuras 8.3 a la 8.9, se observa que dicha forma sigmoidal de la curva del crecimiento acumulado no se define, sino que más bien casi parece una recta y, por lo tanto, no se define con claridad la tendencia del ICA ni su punto máximo, así como tampoco se observa un máximo bien definido en las curvas del IMA, dentro del rango de tiempo considerado.

Para que se pudieran definir dichas curvas con base en un modelo sigmoidal, quizá habría que tratar de ajustar algunos modelos de este tipo, pero para ello se requerirían muestras bien distribuidas y más representativas, pues en el presente caso se analizaron solo 10 árboles de cada población. No obstante, se considera que se logró el objetivo principal de obtener estos d atos que fue hacer una exploración inicial del patrón de crecimiento de las dos especies estudiadas. En una comparación entre el crecimiento de las pináceas asociadas a *Picea mexicana* en tres poblaciones (La Marta, El Coahuilón y Mohinora), Cervantes Angel (2014) encontró que esta especie presenta un crecimiento diamétrico más lento que las otras pináceas en esos sitios, y también lento en comparación con *P. martinezii*.

CONCLUSIONES

En todos los promedios por población, así como en la mayoría de los árboles muestreados en todas las poblaciones el ICA máximo en el radio normal (a 1.30 m) ocurrió a una edad más temprana que el IMA máximo, lo cual indica que un modelo sigmoidal sí podría ajustarse para explicar el crecimiento de estas dos especies de *Picea*. Sin embargo, llama la atención que en varios casos el ICA máximo promedio (de 10 árboles por población) se presentó a una edad demasiado temprana (entre los 5 y 7 años de edad), lo cual no parece lógico, pues por lo general es de esperarse que el ICA máximo ocurra a edades mayores, aunque antes de que el IMA alcance su máximo. Los promedios de ICA e IMA por población se calcularon con datos de edades similares en 10 árboles que se establecieron y desarrollaron en años muy distantes, por lo que en la mayoría de los árboles se tomaron en cuenta solo sus primeros años de vida, hasta un periodo equivalente a la edad del árbol más joven. Esta situación implica que cada árbol pudo haber crecido en condiciones ambientales y de competencia muy diferentes con respecto a los otros árboles de la pre-muestra, aunque los 10 pertenezcan a la misma población. Esto a su vez implica que, aunque aritméticamente se hayan considerado datos de edades similares en los diferentes árboles, en realidad esa muestra no es coetánea, debido a las condiciones diversas en que se desarrolló cada uno de los árboles. Los resultados presentados en este reporte permitieron conocer de manera general los patrones o tendencias de las curvas de crecimiento acumulado en el diámetro de los árboles, así como del ICA y el IMA respectivos y con ello se considera logrado el objetivo propuesto en este trabajo. Sin embargo, para obtener resultados más precisos de las variables mencionadas, sería necesario aplicar un muestreo estadístico aleatorio,

representativo bien distribuido y con suficiente tamaño de muestra según el grado de precisión que se pretenda logar.

PARTICIPACIÓN DE LOS AUTORES

CW es el director técnico del proyecto Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática", Clave de Registro: 17569, del cual forma parte este reporte; JCHD y CW analizaron la información y escribieron el presente reporte; JVD coordinó la toma de las pre-muestras de campo (núcleos de crecimiento) para este reporte y OADC realizó la medición de los incrementos en diámetro de las virutas analizadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a las siguientes personas e instituciones el apoyo recibido: a los dueños de los predios, por haber permitido el acceso para tomar las muestras; al Dr. Celestino Flores López por haber facilitado la logística de campo y haber hecho contacto con los dueños y solicitar el acceso mencionado; y a los MC Javier Hernández Velasco, Eduardo Mendoza Maya y Sergio Leonel Simental Rodríguez, quienes coordinaron las brigadas en la toma de información de campo. También agradecemos al Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACYT, por ser la fuente financiera del proyecto.

REFERENCIAS

Cervantes Angel, G.E. 2014. Crecimiento de pináceas asociadas a poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez en México. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah. 64 p.

Domínguez-Calleros, P.A., F.D.J. Rodríguez-Flores, L. Lizárraga-Mendiola, M.A. Jiménez-Gómez, J. Navar. 2017. Aplicaciones y ejemplos de modelos de crecimiento diamétrico para árboles tropicales. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 4(11): 265-274.

Hernández Díaz J.C. 2017. La silvicultura en México, en el contexto de la cadena productiva forestal. Material de apoyo para la conferencia presentada en el marco de la XLII Sesión Anual Ordinaria de la Asamblea General de la Academia Nacional de Ciencias Forestales, el 25 de agosto de 2017, en la Ciudad de México. en: https://www.researchgate.net/publication/320279578_LA_SILVICULTURA_EN_MEXICO_EN_EL_CONTEXTO_DE_LA_CADENA_PRODUCTIVA_FORESTAL (Consultado: 21 de Abril de 2021).

CAPÍTULO 9

PROPAGACIÓN, PRODUCCIÓN DE PLANTA EN VIVERO Y PLANTACIONES DE PICEAS MEXICANAS

Celestino Flores López [1*], Cuauhtémoc Sáenz Romero[2]

[1] Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Coahuila, México
[2] Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales (INIRENA), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Michoacán, México
*Autor de correspondencia: Celestino Flores, cele64@gmail.com

Las piceas se plantan como árboles maderables en el hemisferio norte y contribuyen significativamente a la economía de muchos países. Sin embargo, en México, las tres especies del *Picea*: *Picea chihuahuana* Martínez, *P. mexicana* Martínez y *P. martinezii* T.F. Patt. se encuentran en estatus de en peligro de extinción (P) (SEMARNAT, 2010) y, de acuerdo a esta norma, las especies no están sujetas a aprovechamiento, solo a conservación. El hábitat específico de cada una de estas especies y su condición genética, implican problemas en su regeneración natural. Al respecto, es importante conocer la forma de propagación de cada especie e implementar estrategias de conservación *in situ* y ex *situ* como son los programas de reforestación, considerando plantar en sitios con condiciones climáticas muy similares a las de la procedencia del germoplasma (Mendoza-Maya *et al*., 2015; Torres-Valverde *et al.,* 2021).

9.1 *Picea chihuahuana* Martínez

Picea chihuahuana (Figura 9.1) se distribuye en la Sierra Madre Occidental en poblaciones pequeñas, en sitios con condiciones específicas de humedad y temperatura propicios para que esta especie se desarrolle. Bajo estas condiciones, la regeneración por unidad de superficie es baja comparada con otras especies de coníferas, debido a problemas de endogamia, insectos como *Cydia phyllisi* Miller y el género *Laspeyresia* (que son causantes hasta un 95% de los daños de semillas en conos), y ardillas del género *Sciurus*, que se alimentan de semillas. Sobre todo, esta especie es también afectada por las cortas clandestinas de árboles jóvenes para árboles de navidad (Narváez *et al.,* 1983; Cibrián *et al.,* 1986; Sánchez y Narváez, 1990; Ledig *et al.,* 1997).

9.1.1 Propagación

La colecta de semillas de *Picea chihuahuana* se realiza desde los primeros días de agosto hasta un mes y medio después. Posteriormente los conos se exponen directamente al sol para deshidratarlos hasta que todas las escamas estén abiertas. Una vez extraida la semilla se elimina el ala, posteriormente la semilla se pone a embeber en agua para separar las vanas de las llenas, por un periodo de 12 horas, también en ocaciones se utiliza la aeración para la separación de semilla vanas. Se almacenan en envases de plástico sellados y se conservan en refrigeración de 0-4 °C; el tiempo de almacenamiento es hasta cinco años para que no pierdan viabilidad las semillas (García-Ayala, 2012).

Con respecto a la propagación asexual, para *P. chihuahuana* se han realizados estudios en reproducción de brotes adventicios *in vitro*. En un primer estudio se promovieron los patrones celulares en el desarrollo del brote de *Picea chihuahuana* y antes de la formación adventicia del brote fue posible determinar la histología de tres grupos de individuos; se encontró que el tiempo óptimo para generar una alta cantidad de brotes adventicios es de 21 a 30 días; también se cultivaron *in vitro* embriones adultos de *P. chihuahuana,* pero la producción de embriones *in vitro* redujo la capacidad morfogenética (López *et al.,* 2000).

Figura 9.1 Copa de árbol y fuste de *Picea chihuahuana* en la localidad Cerro de la Cruz, San Juanito, Chihuahua (fotografías tomadas el 23 de febrero de 2012).

En el segundo estudio se indujeron yemas adventicias a partir de embriones inmaduros, se utilizaron los medios Schenk e Hildebrandt suplementados con benciladenina y kinetina, solas o combinadas con ácido naftalenacético y ácido 2,4-diclorofenoxiacético; los rebrotes adventicios se obtuvieron de diferentes concentraciones de reguladores

de crecimiento, principalmente de los cotiledones; resultando que la kinetina fue más eficaz que la benciladenina para disparar la inducción. Sin embargo, el porcentaje de enraizamiento de los rebrotes fue bajo (Mata *et al.,* 2001).

9.1.2 Producción de planta

La semilla se colecta durante los primeros quince días del mes de septiembre (Sánchez y Narváez, 1990). La germinación se obtiene un mes después de la siembra. El sustrato que se emplea para la producción de planta es corteza compostada o en proceso de compostación y adicionalmente se aplican dos kilogramos de fertilizante osmocote de liberación lenta por m^3 de corteza, con un 20% de perlita mineral, 20% de vermiculita; posteriormente se desinfecta el sustrato aplicando por aspersión el fungicida Busan, el sustrato se proteje con un plástico y se deja reposar de 10 a 15 días, después se destapa y se dejan 10 a 15 días más, antes de utilizar el sustrato (García-Ayala, 2012).

Durante la germinación, para combatir el complejo de hongos *damping off* y especialmente el hongo *Botrytis cinerea* Pers., se aplica Captan de manera preventiva; para el combate de otros hongos se aplican fungicidas como el Ridomil y Blindaje; cuando no se controla el hongo con la aplicación de estos fungicidas de manera alternada se utiliza el Tecto 60. También de forma preventiva se utiliza el control biológico con un hongo antagónico, como *Trichoderma harzianum* Rifai, que se combina con el fungicida Serenade y se aplica a las plántulas (García-Ayala, 2012).

Por otra parte, en el estado de Chihuahua se ha apoyado para la producción de 300,000 plantas de *P. chihuahuana* en el vivero de la comunidad Yahuirachi, Temósachic, Chihuahua, proyecto que ha sido financiado por el Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua (Pronatura México A.C., 2010).

También en el vivero forestal de la Unidad de Manejo Forestal San Juanito A. C. se produce planta de *Picea chihuahuana* (Figura 9.2) (Silva, 2012), se le inoculan ectomicorrizas locales (*Amanita muscaria* (L.) Hook., *A. caesarea* (Scop.) Pers. y *Boletus edulis* Bull.) para fortalecer a la planta y asegurar su establecimiento en las plantaciones. Durante el desarrollo de las plántulas se utiliza una malla sombra de 30% para proteger las plantas de insolación. Se debe considerar al menos de 2 a 3 años en vivero para que la planta tenga la talla y las condiciones para ser plantada al campo (García-Ayala, 2012).

9.1.3 Plantaciones

Con fines de conservación *in situ*, se han realizado pocas plantaciones en el estado de Chihuahua. Una plantación se realizó en el paraje Cerro de la Cruz, municipio de Bocoyna, Chihuahua, cuando estuvo el proyecto de Bosque Modelo entre los años 1992 y 1995, en una superficie de media hectárea, donde solo sobreviven nueve ejemplares de esta especie (García-Ayala, 2012). La segunda, se realizó en la localidad El Ranchito, municipio de Bocoyna, Chihuahua, aquí se encuentra una población de *Picea chihuahuana*, en esta población se realizó una plantación a tresbolillo con espaciamiento de tres metros y a los individuos plantados se les hizo una microcuenca para la captación de agua (Figura 9.3).

Además, esta especie ha sido introducida como especie exótica en varios países y jardines botánicos, pero en un número reducido de individuos. En el Royal Botanic Garden, Kew ubicado en el Reino Unido se encuentran ejemplares de *Picea chihuahuana* (Jin *et al.,* 2006). Con fines experimentales se ha plantado cerca del Lago Erie, Ontario y otras plantaciones en Canadá (Gordon, 1990). Un árbol plantado en Medford, Oregon, crece con buen vigor y su incremento en altura anual ha sido de 75 cm en promedio, se encuentra expuesta al sol y no se le aplica riego, el crecimiento de esta especie es mayor que el de *Picea pungens* Engelm. (Grimshaw y Bayton, 2009). En el Jardín Botánico Internacional de Conservación en Knoxville, Tennessee, Estados Unidos de América, se desarrolló un programa donde se han realizado plantaciones de individuos de *Picea chihuahuana* (Hamilton, 2011).

Figura 9.2 Producción de planta de *Picea chihuahuana* Martínez bajo malla sombra (plantas con 15 años de edad), vivero de la Unidad de Manejo Forestal San Juanito A.C. (23 de febrero de 2012).

Figura 9.3 Plantación de *Picea chihuahuana* en el paraje El Ranchito, municipio de Bocoyna, Chihuahua (23 de febrero de 2012).

9.2 *Picea martinezii* T.F. Patt.

Picea martinezii (Figura 9.4) produce semillas cada dos años, con un potencial de semillas promedio de 266 por cono, pero su viabilidad es baja (promedio de semillas llenas por cono del 7%). Una gran cantidad de semillas se pierden por óvulos abortados, óvulos rudimentarios y semillas vanas, lo que representa pérdidas por endogamia de alrededor de 75%, debido a que las poblaciones son muy pequeñas y por lo tanto es probable que no exista una adecuada polinización cruzada, incrementando la endogamia, la reducción del tamaño de la semilla, la capacidad germinativa y el desarrollo normal de plántulas (Flores-López *et al.,* 2005; López Ramírez, 2007; Flores-López *et al.,* 2013; Flores López 2014).

Figura 9.4 Copa de árbol de *Picea martinezii* en la localidad de Agua de Alardín, Aramberri, Nuevo León.

9.2.1 Propagación

La propagación por semilla en *Picea martinezii* es crítica ya que los porcentajes de germinación son bajos, dentro de esta resalta el de La Encantada con baja germinación (2%) y mayor porcentaje de plántulas anormales (como anormalidad se reconocen enanismo, germinación inversa y encorvamiento del epicotílo; 72%), para las poblaciones de Agua Fría, Agua de Alardín y El Butano los porcentajes de germinación fueron mayores (26, 25.5 y 38.4% respectivamente) y de antemano menor porcentaje de plántulas anormales (47.3, 43.8, y 44% respectivamente) (Flores-López 2014).

La propagación sexual es viable, pero típicamente presenta la dificultad de una producción de semillas usualmente muy baja, tanto por el número de conos maduros producidos, como por la baja proporción de semillas llenas por cono (aproximadamente 40 % del potencial de producción de semillas; datos no publicados; Eduardo Mendoza Maya, tesis, Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango) (Mendoza-Maya, 2021). Esta dificultad se deriva seguramente de cierto nivel de endogamia en las poblaciones naturales, lo cual es común en poblaciones pequeñas, fragmentadas, de especies con distribución relictual.

9.2.2 Producción de planta

La producción de planta en vivero se ve limitada por la falta de suministro de semillas viables en cantidades suficientes. Además, la velocidad de crecimiento de las plántulas, típicamente es bajo. Por ejemplo, en la producción en invernadero de planta de El Salto, Durango, las plántulas alcanzaron una altura promedio de 11 cm a un año de edad (Torres-Valverde *et al.,* 2021).

También en el vivero forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro se ha propagado *P. martinezii* (Figura 9.5) y *P. mexicana* con fines de conservación e investigación. Para ambas especies se han utilizado charolas de unicel de 77 cavidades, con volumen de cavidad de 170 ml ; el sustrato utilizado es una combinación de un saco de peat moss de 155 l, un saco de perlita de 100 l, un saco de vermiculita de 144 l y adicionalmente se agregó el fertilizante osmocote en cantidad de 1.5 kg; los riegos se realizaron cada tercer día a saturación del sustrato; las charolas se han mantenido en condiciones de invernadero con temperatura de 25 °C ± 2 °C con panel de enfriamiento; a medio año de crecimiento se aplicó un fertilizante iniciador 9-45-15, un kilogramo por 200 l de agua; en especial para *P. martinezii* se adicionó la protección de una malla sombra de 75% monofilamento negro de forma permanente (Braham-Sabag, 2021).

9.2.3 Plantaciones

Se desconocen plantaciones *in situ* de *Picea martinezii*, sin embargo, se ha utilizado como ornamental en jardines botánicos. Rushforth (1986) reporta que semillas de *P. martinezii* (citada como *P. chihuahuana* de Nuevo León) han sido introducidas a jardines botánicos europeos como los Royal Botanic Gardens Kew y otros arboretos de Europa, Tasmania y New Zealand. En la web se encuentran imágenes de esta especie en San Francisco Botanical Garden (https://sfbg.gardenexplorer.org/taxon-8439.aspx). Actualmente en el Arboretum de Wespelaar tiene ejemplares de *P. martinezii* (https://www.arboretumwespelaar.be/Default.aspx?WPID=291&L=N&DNa=Picea+martinezii), de una colección hecha por Rob Nicholson y equipo del Arnold Arboretum en 1997, de la localidad El Butano, Nuevo León, México (International Dendrological Society, 2018).

Figura 9.5 Plántulas de *Picea martinezii* en el vivero forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

9.3 *Picea mexicana* Martínez

Las poblaciones de *Picea mexicana* (Figura 9.6) presentan un número reducido de individuos en clases diamétricas reproductoras para mantener la variabilidad y viabilidad de esas poblaciones y con indicadores reproductivos bajos (Flores López, 2014). Las poblaciones de La Marta tienen semillas más grandes con relación a las restantes. Esto puede relacionarse estrechamente con indicadores reproductivos, donde aparecen sin diferencias significativas con El Coahuilón y Mohinora; en este sentido, la presencia de semillas más pequeñas pudiera estar relacionada con indicadores reproductivos más bajos asociados a baja densidad de individuos reproductivos en las poblaciones y a patrones de aislamiento entre poblaciones (Flores-López *et al.,* 2005).

Figura 9.6 Árbol de *Picea mexicana* en la localidad El Mohinora, Chihuahua (1 de abril de 2013).

9.3.1 Propagación

Al igual que ocurre con *P. martinezii*, en *P. mexicana* la propagación sexual es viable, pero presenta la dificultad de una producción de semillas usualmente muy baja, tanto por el número de conos maduros producidos, como por la baja proporción de semillas llenas por cono (aproximadamente 50 % del potencial de producción de semillas (Mendoza-Maya, 2021).

Se han realizado pruebas de germinación en laboratorio bajo condiciones controladas de semillas de *P. mexicana* colectadas en 1999 y 2001, donde se encontró que el almacenamiento en frío ayuda a incrementar el porcentaje de germinación, no así otros tratamientos pre-germinativos (Sierra Villagrana, 2005). También en otro análisis de germinación de *P. mexicana* las poblaciones El Mohinora y La Marta presentaron los porcentajes más altos de germinación (53.5 y 32.5% respectivamente) contrastando con la población El Coahuilón (9.2%), la cual presentó los porcentajes más altos de semilla no germinada (53.7%); sin embargo, en plántulas anormales los porcentajes variaron entre 10.1 y 16.9% (Flores López, 2014). De acuerdo con estos resultados, los porcen-

tajes de germinación son bajos, teniendo como consecuencia plántulas anormales y si agregamos el porcentaje de semillas no germinadas como anormalidad, podemos indicar que estas poblaciones están en riesgo, en especial la población El Coahuilón.

Por otra parte, en el Arboretum de Villardebelle se ha propagado exitosamen en vivero *Picea mexicana* para conservación e investigación (http://www.pinetum.org/sp/PCmexicana.htm). Este arboretum está localizado al suroeste de Francia en el Departamento de l'Aude, entre 510 y 670 m snm.

9.3.2 Producción de planta

Se tiene conocimiento que, en invernadero en El Salto, Durango, se han producido plántulas de *P. mexicana* que alcanzaron una altura promedio de aproximadamente siete centímetros a un año de edad (Torres-Valverde *et al.*, 2021). Como se mencionó en el apartado *P. martinezii*, también en el vivero forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro se ha propagado *P. mexicana* con fines de conservación e investigación y la producción de planta ha sido similar en ambas especies; la diferencia para esta especie es que dentro del invernadero durante un año se ponen las charolas cerca del panel de enfriamiento, posteriormente se transplantan a bolsa de vivero 10 x 24 cm con fuelle calibre 400 colocandolas fuera del invernadero bajo protección de una malla sombra de 75% monofilamento negro de forma permanente (Braham-Sabag, 2021).

9.3.3 Plantaciones

Las plantaciones presentes de *P. mexicana* se han realizado con fines de conservación y como programas de reforestación con fines de restauración. En el Cerro El Coahuilón, Arteaga Coahuila, hay plantaciones en la pequeña propiedad de Sergio Braham Sabag, a una altitud de 3,025 m snm. La primera plantación se realizó hace 20 años (Figura 9.7), inicialmente se plantaron 250 piceas y actualmente sólo 10 de éstas sobrevivieron, y solo cuatro de ellas producen conos. La segunda plantación tiene cinco años, dos años en el vivero y tres años en la plantación, se plantaron 70 y solo murieron tres de éstas, actualmente ya tienen producción de conos (Figura 9.8) (Braham-Sabag, 2021).

Y con fines de restauración se conoce una plantación realizada en el Cerro El Mohinora propiedad del Ejido Tule y Portugal. Esta plantación se realizó en el lugar descubierto de la población de *Picea mexicana*, que anteriormente tuvo un incendio, la planta se ubicó al lado de los carriles hechos de madera en proceso de descomposición, acomodada siguiendo las curvas a nivel; cada planta tiene una microcuenca en forma de media luna aguas arriba de la pendiente y protegida parcialmente con piedras alrededor de la cepa colocadas aguas abajo (Figura 9.9).

Es importante señalar que las plantaciones de *P. chihuahuana y P. mexicana* mencionadas, han tenido pérdidas sustanciales en el proceso de adaptación de la planta en los lugares establecidos, esto se debe en parte a que estas especies son tolerantes a la sombra y requieren de una exposición norte que les permita tener sombra gran parte del día y estar dentro del rango altitudinal de distribución natural. Así también, la producción de planta requiere tiempo en vivero para que se desarrolle la planta a un tamaño donde

se diferencien las plantas normales y descartar las anormales al momento de realizar las plantaciones, esta actividad es necesaria para asegurar la sobrevivencia y adaptación, ya que ambas especies tienen problemas de endogamia.

Figura 9.7 Plantación de *Picea mexicana* a 20 años de establecida con fines de conservación en la propiedad particular en el Cerro El Coahuilón, Arteaga, Coahuila a 3,025 m snm (Fotografía tomada por S. Braham-Sabag, 28 de marzo de 2019).

Figura 9.8 Plantación de *Picea mexicana* con cinco años de edad, realizada con fines de conservación en propiedad particular en el Cerro El Coahuilón, Arteaga, Coahuila a 3,025 m snm. Presencia de estróbilos femeninos y masculinos (Fotografías tomadas por Sergio Braham-Sabag, 4 de noviembre de 2020).

Figura 9.9 Plantación de *Picea mexicana* en el Cerro El Mohinora, Guadalupe y Calvo, Chihuahua, con fines de restauración a 2,986 m snm (30 de marzo de 2013).

REFERENCIAS

Braham-Sabag, S. 2021. Comunicación personal, 17 de septiembre de 2021. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Forestal. Avenida Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila. Correo electrónico: sergiobraham@yahoo.com.mx

Cibrián, T.D., Ebel, H.B., Yates, O.H., Méndez, M.J.T. 1986. lnsectos de conos y semillas de las coníferas de Mexico / Cone and seed insects of the Mexican conifers. Universidad Autónoma Chapingo, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México *I* U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Spanish and English texts. Gen. Tech. Rep. SE-40. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station; 110 p.

García-Ayala, H. 2012. *Picea chihuahuana* Martínez (PINACEAE). Monografia. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 61p.

Gordon, A. G. 1990. Crossability in the genus *Picea* with special emphasis on the Mexican species. *In* Ontario Forest Research Institute. Joint Meeting of Western Forest Genetics Association and IUFRO Working Parties. Olympia, Washington, USA August 20-24, 1990. IUFRO. Weyerhaeuser. WFGA. pp 1-3.

Grimshaw, J. andR. Bayton. 2009. Recent new trees: Introductions to cultivation. International Dendrology Society - Kew Publishing, Royal Botanic Gardens Kew, UK. 992 pp.

Hamilton, S. 2011. ACS Reference Gardens Play a Global Role in Plant Conservation. The University of Tennessee Gardens Conifer Collection Development. Southeastern Conifer. American Society, Newsletter— June 2011. pp. 2-5.

Flores-López, C. 2014. Líneas para la conservación de los recursos genéticos de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, Facultad de Forestal y Agronomía. Pinar del Río, Cuba. 90 p. +Bibliografía+Anexos.

Flores-López C., J. López-Upton y J.J. Vargas-Hernández. 2005. Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. Agrociencia 39: 117-126.

Flores-López, C., G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2013. Variación morfológica en poblaciones naturales *Picea mexicana* Martínez. Revista Forestal Baracoa 32(2): 3-9.

International Dendrological Society. 2018. *Picea martinezii* T.F. Patt. en Trees and Shrubs Online. http://treesandshrubsonline.org/articles/picea/picea-martinezii/ (Consultada 18 de septiembre de 2021)

Jin, H.R., Xiao, X.W., and Xiao, Q.W. 2006. Molecular phylogeny and biogeography of *Picea* (Pinaceae): Implications for phylogeographical studies using cytoplasmic haplotypes. Molecular Phylogenetics and Evolution 41: 405-419.

Ledig, T. F., Jacob, C. V., Hodgskiss, and P. D., Eguiluz, P. T. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. Evolution 51(6): 1815-1827

López, E. A. L. Olguín, S. L. P. Márquez, J. Chávez, V. M. 2000. Adventitious bud formation from mature embryos of *Picea chihuahuana* Martínez, an endangered mexican spruce tree. Annals of Botany 86 (5): 921-927.

López Ramírez, E. 2007. Producción de semillas e indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea martinezii* T.F. Patterson. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 36 p.

Mata, R. M., Chávez, A. V. M., Bye, B. R. 2001. *In vitro* regeneration of plantlets from immature zygotic embryos of *Picea chihuahuana* Martínez, an endemic Mexican endangered species. In Vitro Cellular & Developmental Biology, Plant 37(1): 73-78.

Mendoza-Maya, E., J. Espino-Espino, C.Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J.J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero. 2015. Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de *Picea* en peligro de extinción. Revista Fitotecnia Mexicana 38(3): 235-247.

Mendoza-Maya, E. 2021. Comunicación personal, 17 de septiembre de 2021. Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México. Correo electrónico: edumm1985@gmail.com

Narváez F., R., J. Sánchez, C., y A. Olivas M. 1983. Distribución y población de *Picea chihuahuana*. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), Centro de Investigaciones Forestales Norte, Nota Técnica no. 6. 9 p.

Pronatura México A. C. 2010. Informe anual 2010, Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua. Coca-Cola, Pronatura México A. C., Comisión Nacional Forestal, Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas. Pronatura México A. C. 149 p. [Acceso: 17 septiembre 2021]. https://www.yumpu.com/es/document/

read/16329869/informe-anual-pronatura.

Rushforth, K. 1986. Mexico's spruces - rare members of an important genus. Kew Magazine 3(3): 119-124.

Sánchez, C., J. y R. Narváez F. 1990. Plan integral para la protección y fomento de *Picea chihuahuana* Martínez. Ecosistemas Forestales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1, 37–55.

SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres - categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación (D.O.F) 30 de diciembre de 2010. 1-78 p. [Fecha de consulta: 14 septiembre 2021]. http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_ SEMARNAT_2010.pdf

Sierra Villagrana, A.E. 2005. Viabilidad de semillas de *Picea mexicana* Martínez y su relación con indicadores reproductivos. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 61 p.

Silva R., S. 2012. Comunicación personal, 23 febrero 2012. UMAFOR San Juanito, Calle División del Norte entre 14 y 16 del Barrio PROFORTARAH. http://www.umaforsanjuanito.com, Bocoyna, chihuahua.

Torres-Valverde, J.M., J.C. Hernández-Díaz, A. Carrillo-Parra, E. Mendoza-Maya and C. Wehenkel. 2021. Provenance Trials of the Mexican Spruces in Nursery Conditions: Three Species Endangered by Climatic Variation. Environ. Sci. Proc. 2021, 3, 12. https://doi.org/10.3390/

Esta publicación se editó en
la Comisión Nacional Forestal
en julio de 2022.

La edición digital está disponible en
gob.mx/conafor

Distribución gratuita.

LAS PICEAS (*Picea*, PINACEAE) DE MÉXICO

Picea está representado en México por tres especies, todas endémicas y de distribución relictual: *Picea chihuahuana* (Chihuahua y Durango), *P. martinezii* (Nuevo León) y *P. mexicana* (Coahuila y Chihuahua).

Con la participación de 15 especialistas de siete instituciones mexicanas, se presenta una panorámica general del conocimiento sobre la taxonomía, distribución, aspectos ecológicos, genética, censos y estructura poblacional, manejo y estado de conservación de *Picea* en el país.

Esta revisión se deriva del proyecto "Cambios demográficos, reproducción y estatus de poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez y *Picea martinezii* Patterson en México: especies susceptibles a eventos de variabilidad climática" (CONAFOR-CONACYT-2017-4).

Sobre esta síntesis pueden guiarse futuras investigaciones sobre los múltiples huecos de información que aún persisten: aspectos sobre sus patógenos, relaciones micorrícicas, relaciones con el resto de la flora, dinámica poblacional, y aprovechamiento a través de cultivo. Estos y otros temas representan ventanas de oportunidad para alcanzar una comprensión cabal sobre las piceas mexicanas y mejorar los programas de manejo de estos magníficos árboles.

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
CONAFOR
COMISIÓN NACIONAL FORESTAL
UJED
Universidad Juárez del Estado de Durango