



Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México

Modeling of the current distribution and under climate change of endemic pinyon pines of Mexico

Ramiro Pérez Miranda¹, Martín Enrique Romero Sánchez^{1*}, Antonio González Hernández¹, Sergio Rosales Mata², Francisco Moreno Sánchez¹ y Víctor Javier Arriola Padilla¹

Abstract

At present, some endemic pines of Mexico are at risk due to several factors, either anthropogenic or related to climatic alterations. In this work the current potential distribution and under climate change scenarios was modeled for four species of pinyon pines. For this purpose, bioclimatic coverages and data on the presence of four pine-tree species were used as predictive variables. Results suggest a good prediction of geographic distribution patterns (AUC > 0.9 in all cases). The high potential distribution with the GFDL-CM3 model for the 2049-2065 horizon PCR 4.5 scenarios had species-specific modifications on its surface. The most sensitive species were *P. culminicola*, *P. johannis* and *P. pinceana* which showed reductions of 83.6, 59.5 and 80.0 %, respectively, compared to the current surface. In scenario RCP 8.5, the reductions of these species were 83.7, 56.9 and 79.3 %, for each one. The distribution models of *P. nelsonii* showed for both climate scenarios (RCP 4.5 and 8.5), increases in the high potential extension with respect to the current one up to 50.8 % and 49.5 % respectively. Climate change scenarios show that pines will be affected in their distribution in the near future due to changes in precipitation and temperature patterns.

Key words: Spatial analysis, scenarios, potential distribution, MaxEnt, pinyon pines, GIS.

Resumen

En la actualidad algunos pinos endémicos de México están en riesgo, debido a diversos factores, tanto antrópicos como relacionados con alteraciones climáticas. En este trabajo se modeló la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático de cuatro especies de pinos piñoneros. Para ello, se utilizaron coberturas bioclimáticas y datos de presencia de los taxones considerados, como variables predictoras. Los resultados sugieren una buena predicción de los patrones de distribución geográfica (AUC > 0.9 en todos los casos). La distribución potencial alta generada con el modelo GFDL-CM3, para el horizonte 2049-2065 escenarios RCP 4.5 tuvo modificaciones específicas por taxon en su superficie. Las especies más sensibles fueron *Pinus culminicola*, *P. johannis* y *P. pinceana* que evidenciaron reducciones de 83.6, 59.5 y 80.0 %, respectivamente; comparados con la superficie actual. En el escenario RCP 8.5, las reducciones de estos *taxa* fueron de 83.7, 56.9 y 79.3 %, para cada una. Los modelos de distribución de *P. nelsonii* mostraron, para ambos escenarios climáticos (RCP 4.5 y 8.5), aumentos en la extensión potencial alta con respecto a la actual hasta de 50.8 % y 49.5 %, respectivamente. Los escenarios de cambio climático indican que la distribución de los pinos piñoneros será afectada en el futuro cercano por los cambios en los patrones de precipitación y temperatura.

Palabras clave: Análisis espacial, escenarios, distribución potencial, MaxEnt, pinos piñoneros, SIG.

Fecha de recepción/ Reception date: 8 de junio de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 2 de octubre de 2019

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. INIFAP. México.

²Campo Experimental Valle de Guadiana. INIFAP. México.

Autor por correspondencia; correo-e: romero.martin@inifap.gob.mx

Introducción

La abundancia y distribución espacial de los seres vivos en la Tierra se rige por la amplitud ecológica o capacidad de tolerancia que presenta cada especie a factores ambientales (Thuiller *et al.*, 2012). En el caso de las comunidades vegetales, se ha observado que se asocian fundamentalmente a factores edáficos, geográficos y climáticos (Ríos *et al.*, 2016); de ellos, los últimos son los principales responsables (Berry *et al.*, 2002). Sin embargo, proyecciones futuras indican tendencias crecientes en los gases de efecto invernadero, lo que dará como resultado un mundo más cálido, más húmedo y dinámico en el siglo XXI, caracterizado por eventos extremos (Tebaldi *et al.*, 2006). Por esa razón se espera que el efecto del cambio climático exija una selección adaptativa más fuerte que conlleve a un distanciamiento de las poblaciones sobre los entornos a los que están adaptadas (Davis y Shaw, 2001); lo cual modificará su distribución actual, o incluso provocará la desaparición directa de algunas de ellas. México es considerado como un centro secundario de diversificación del género *Pinus*, con 49 de las 120 especies identificadas en el mundo; de ellas, 22 son endémicas, de las cuales 10 corresponden a pinos piñoneros (Gernandt y Pérez, 2014), y se esperaría que los efectos del clima limiten aún más su distribución.

Los pinos piñoneros son de gran relevancia para las zonas áridas del país, ya que en ocasiones constituyen el único recurso forestal (Rosas *et al.*, 2015). Por otro lado, también son reconocidos por su amplia adaptabilidad y resistencia a condiciones adversas, lo que les confiere un estatus de especies con gran potencial para la restauración ecológica (Ríos *et al.*, 2008). No obstante, diversos de sus bosques han presentado una disminución del área que cubren, desapareciendo o cambiando su composición (Gernandt y Pérez, 2014).

Actualmente, seis especies endémicas de pinos piñoneros están en la lista de especies en riesgo de la NOM-059-SEMARNAT-2010 designadas en la categoría en Peligro de Extinción o Sujeta a Protección Especial (Semarnat, 2010). El objetivo del estudio que aquí se documenta fue determinar la distribución potencial actual y mediante

escenarios de cambio climático de cuatro especies de pinos piñoneros endémicos de México incluidos en la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los bosques naturales de pino en México se localizan entre las siguientes coordenadas extremas: al norte del país: 32°43'06" N, 114°43'22" O; al oeste: 29°03'54" N, 122°10'13" O; al este 16°06'03" N, 91°20'06" O.; al sur 11°58'07" N, 94°26'02" O. Están presentes en casi todos los estados de la república mexicana, excepto en Aguascalientes, Baja California Sur, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán (Figura 1). Las cadenas montañosas más importantes donde se localizan estas especies son Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Sierra del Sur (Inegi, 2016).

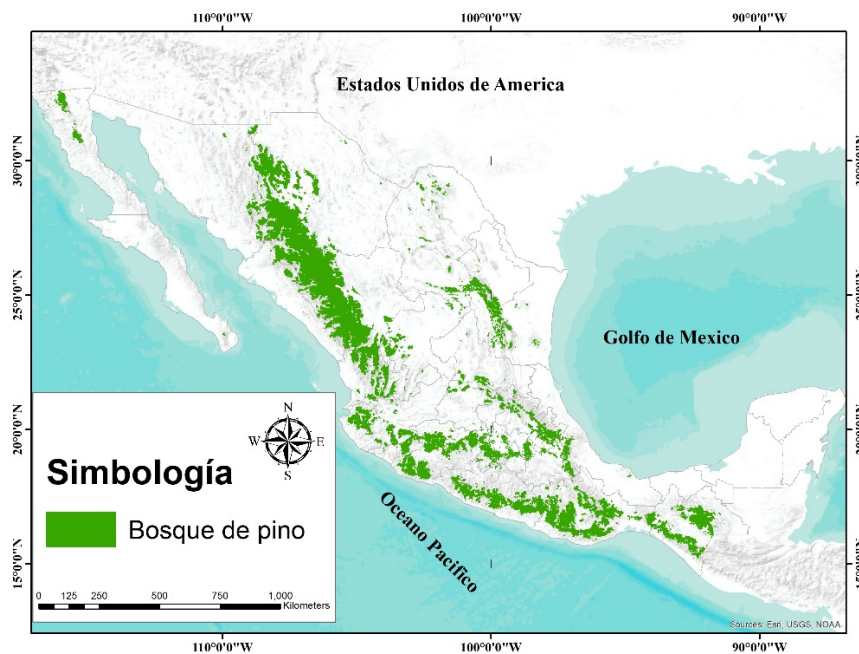


Figura 1. Localización de los bosques de pino en la república mexicana.

Los climas dominantes en los bosques de pino son templados subhúmedos [C(w), en 25 % de la superficie total del país], semicálidos subhúmedos [(A)C, 24.5 %], semiáridos y áridos (BS, 11.5 %), semifríos subhúmedos (Cb, 10.5 %), cálidos subhúmedos (Aw, 6.0 %), y otros climas diversos (22.5 %) (Inegi, 2016).

La altitud donde crecen estas masas forestales varía entre los 200 m hasta los 4 200 m sobre el nivel del mar (Inegi, 2016). Las temperaturas extremas comprenden de 0 a 40 °C; aunque, la mayoría se ubican en sitios con registros de 0 a 17 °C (Guevara y Arroyo, 2016; Inegi, 2016). En México, los bosques de pinos se hallan, especialmente, sobre rocas ígneas, también en forma regular se localizan sobre gneis y esquistos, en menor frecuencia sobre margas, areniscas, lutitas y calizas. La mayor parte de los pinares tolera los suelos ácidos (Rzedowski, 2006). Los tipos de suelo donde se desarrollan fundamentalmente son Litosol, Regosol eútrico, Feozem háplico, Cambisol eútrico, Luvisol crómico, Cambisol crómico, Andosol húmico, Cambisol dístico, Acrisol húmico y Andosol ócrico (INIFAP-Conabio, 1995).

Datos de presencia de las especies de pinos piñoneros

Se trabajó con cuatro especies de pinos piñoneros en categorías de riesgo de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010: *Pinus culminicola* Andresen & Beaman, *Pinus johannis* M. F. Robert, *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus pinceana* Gordon. Se elaboró una base de datos geográficos con un total de 884 registros obtenidos de diferentes herbarios: Herbario CHAP de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo; Herbario Hortorio (CHAPA) del Colegio de Postgraduados; Herbario Metropolitano (UAMIZ) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa; Herbario Nacional Forestal, "Biól. Luciano Vela Gálvez" (INIF) del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria (INIFAP) - Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid-Comef); Herbario del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Durango del Instituto Politécnico Nacional; Herbario CFNL de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad

Autónoma de Nuevo León; Herbario XAL del Instituto de Ecología, A. C. y Herbario ENCB de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. Además, se consultaron herbarios digitales y páginas electrónicas destacadas de grandes colecciones de plantas como el Herbario Nacional de México (MEXU) de la Universidad Nacional Autónoma de México, el Herbario Virtual de la Comisión Nacional para la Conservación y Uso de la Biodiversidad (HVC) y la Red de Herbarios del Noreste de México (Herbanwmex). Otras fuentes de datos fueron el Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) y la literatura científica.

Variables climáticas

Se emplearon coberturas climáticas, topográficas y edafológicas, con una resolución de 926 m. Se utilizaron 19 capas en formato ráster: temperatura y precipitación del periodo climático 1902-2011, provenientes de *WorldClim* (Fernández *et al.*, 2019). Las coberturas de altitud, exposición y pendiente se obtuvieron del procesamiento del Modelo Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM), disponible en la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2018) y la edafológica se generó de la capa vectorial de Edafología de INIFAP-Conabio (1995).

Para el modelo de distribución con proyecciones de cambio climático, se consideró el modelo de circulación general (MCG) GFDL-CM3 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model version 3*) de Estados Unidos de América, bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y Sendas Representativas de Concentración (RCP) 4.5 y 8.5, así como horizonte de futuro medio (2045-2069). Los RCP se refieren al forzamiento radiativo expresado en $W m^{-2}$ y se asume que varía al incrementarse los GEI. Estas coberturas se obtuvieron de la página de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la UNAM (Fernández *et al.*, 2015).

Modelado de la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático

Los modelos de distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático de las especies piñoneras se generaron con el programa *MaxEnt* 3.4.1 (*Maximum Entropy*) (Phillips y Dudík, 2008), *software* que estima la probabilidad de presencia de una especie buscando la distribución de máxima entropía (la más uniforme posible), en función de variables ambientales (covariables) y datos de ocurrencia (Phillips *et al.*, 2006). La probabilidad se expresa en términos de "ganancia", la cual se calcula como el logaritmo del número de celdas en la retícula, menos el promedio de las probabilidades logarítmicas negativas de las localidades utilizadas para ajustar el modelo (Phillips *et al.*, 2006; Phillips y Dudík, 2008).

Durante la ejecución de los modelos se mantuvieron los parámetros predeterminados por el programa *MaxEnt*, como lo sugieren Phillips *et al.* (2006). Se realizó una réplica del modelo para cada especie, mediante la selección aleatoria de 75 % de las localidades de ocurrencia para el entrenamiento del modelo y las restantes (25 %) como datos de prueba para la validación.

Umbral de corte para la definición de categorías

Para generar los modelos de predicción se determinó el umbral de corte. El valor establecido para el presente estudio corresponde a las siguientes categorías: 0 como nula, ≤ 0.30 baja, 0.30 - 0.60 media y ≥ 0.60 alta. El análisis e interpretación de los modelos generados por *MaxEnt* se ejecutó con el *software ArcMap* 10.4.



Evaluación de los modelos de distribución

La calidad de predicción de los modelos de distribución se determinó con la técnica de evaluación de la característica operada por el receptor (ROC: *Receiver Operating Characteristic*), a partir del análisis del área bajo la curva (AUC: *Area Under the Curve*). El AUC es la representación gráfica de la capacidad discriminativa de un modelo para todos los posibles puntos de corte y puede interpretarse como la mayor probabilidad de que un punto de presencia seleccionado aleatoriamente esté ubicado en una celda del ráster, con un alto valor de probabilidad para la presencia de la especie.

Los valores del área bajo la curva se categorizan así: Excelente ($AUC > 0.9$), Buena ($0.8 < AUC < 0.9$), Aceptable ($0.7 < AUC < 0.8$), Mala ($0.6 < AUC < 0.7$) y No Válida ($0.5 < AUC < 0.6$) (Araujo *et al.*, 2005; Elith *et al.*, 2006). Además, se estimó el Intervalo de Confianza para cada una de las estimaciones a una probabilidad de 95 %. Los análisis estadísticos se realizaron con el *software* R versión 3.4.2.

Resultados y Discusión

Validación de los modelos

Los modelos generados sugieren una buena predicción de los patrones de distribución geográfica actual y bajo escenarios para los cuatro taxones de pinos piñoneros bajo estudio. Los valores de AUC de los datos de entrenamiento y validación se estimaron por encima de 0.9 (Cuadro 1). De acuerdo con Elith *et al.* (2006), los modelos con valores de AUC de 0.75 son útiles para predecir la distribución de especies; en ese sentido, los valores de AUC mayores a 0.91, obtenidos en este trabajo, indican que los modelos están altamente descritos por las variables bioclimáticas. El AUC más alto (0.99) se registró para la especie más restringida geográficamente, *Pinus nelsonii*. La validez de los modelos se comprobó con los estadísticos usados. En todos los casos, la AUC estuvo arriba de 90 % y hubo significancia ($p\text{-value} < 0.05$) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros estadísticos para la validación de los modelos de distribución potencial de cuatro especies de pinos piñoneros.

Especie	Actual			RCP 4.5			RCP 8.5		
	AUC	P-value	IC 95 %	AUC	P-value	IC 95 %	AUC	P-value	IC 95 %
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	0.98	<0.05	0.86	0.95	<0.05	0.87	0.95	<0.05	0.74
<i>Pinus johannis</i> M. f. Robert	0.97	<0.05	0.81	0.96	<0.05	0.81	0.96	<0.05	0.61
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	0.98	<0.05	0.92	0.92	<0.05	0.92	0.93	<0.05	0.71
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	0.95	<0.05	0.94	0.91	<0.05	0.95	0.92	<0.05	0.87

AUC = Área bajo la curva; IC 95 %= Intervalo de Confianza de 95 %.



Contribución de las variables en la modelación de las especies

En los modelos actuales, las variables que más influyeron en la modelación de la presencia de *P. culminicola* fueron la temperatura (58.1 %) y la precipitación (26.3 %); mientras que, en *P. johannis*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* fueron la precipitación (38.4 %, 61.1 % y 42.0 %, respectivamente) y la altitud (29.9 %, 20.2 % y 32.2 %, respectivamente); el resto de las proporciones correspondieron a las variables, pero en menor medida. Con el escenario RCP 4.5, las proporciones fueron: en *P. culminicola* la temperatura, con 54.3 %; y la precipitación, con 17.6 %. En *P. johannis*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* correspondieron a la altitud (50.7 %, 40.2 % y 53.2 %, respectivamente) y a la precipitación (27.7 %, 33.7 % y 24.7 %). Con el escenario RCP 8.5, para *P. culminicola* fueron: la temperatura (53.3 %) y la precipitación (18.2 %), en *P. johannis*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* fueron la altitud (51.2 %, 40.4 % y 53.5 %) y la precipitación (27.0%, 33.5% y 25.2%); el resto de las proporciones recayeron en las demás variables, pero en valores más reducidos.

La importancia de las variables en los modelos es coincidente con lo indicado por Rojas *et al.* (2012) y Mateo *et al.* (2013), quienes señalaron que el clima es fundamental y muy utilizado en la modelación de distribuciones geográficas potenciales.

Modelado de la distribución potencial actual

El *P. pincena* tiene mayor extensión de superficie idónea alta y, en menor proporción, le siguen *P. johannis*, *P. nelsonii* y *P. culminicola*.

En el Cuadro 2 se presenta la superficie de distribución potencial con categoría: Alta, Media y Baja de los cuatro piñoneros en México.



Cuadro 2. Superficies de distribución potencial actual de pinos piñoneros (hectáreas).

Especie	Alta	Media	Baja	Total
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	126 792	266 320	8 002 135	8 395 246
<i>Pinus johannis</i> M. f. Robert	495 291	1 260 637	10 726 812	12 482 741
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	222 843	1 484 916	4 877 643	6 585 402
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	2 081 718	8 144 249	25 961 331	36 187 297

Las áreas idóneas de *P. culminicola* y *P. nelsonii* se ubican, principalmente, en los estados de Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas, San Luis Potosí y zonas mínimas que se limitan a Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Se estima que *P. johannis* se desarrolla en Coahuila, Zacatecas, Guanajuato, Tamaulipas, Hidalgo, Nuevo León y Coahuila, y en menor medida, en otros estados. La distribución de *P. pinceana* registró el mayor intervalo de todas las especies, pues se extiende hacia Coahuila, Durango, San Luis Potosí, Zacatecas, Nuevo León, Guanajuato y Chihuahua y, en menor proporción, en Querétaro e Hidalgo (Figura 2).

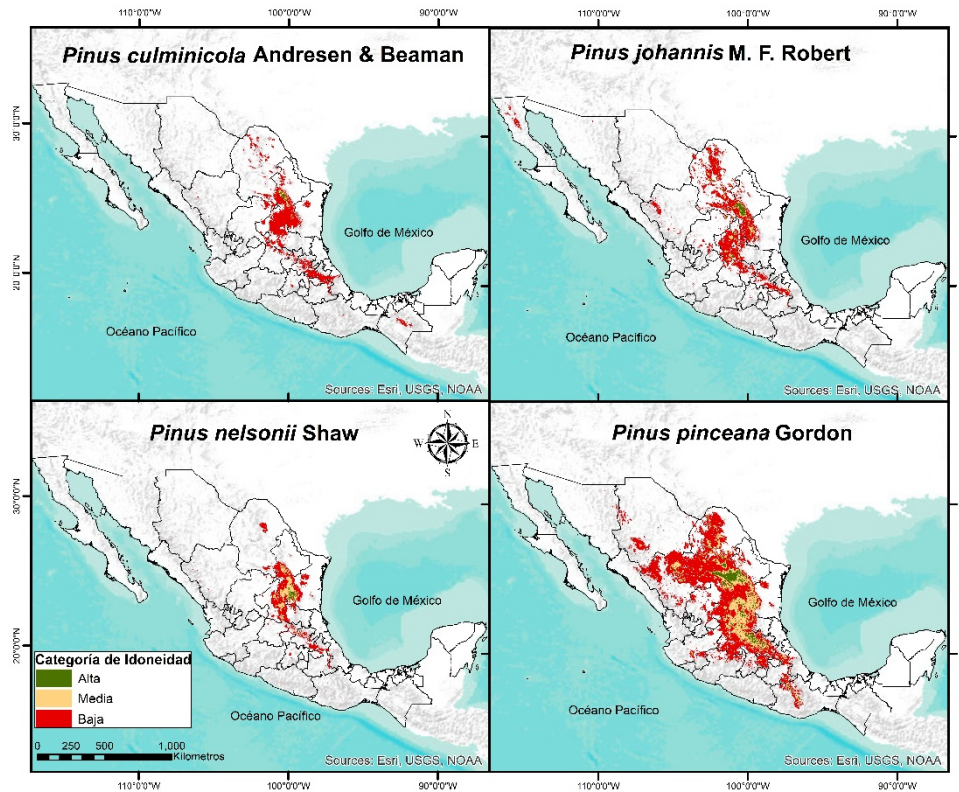


Figura 2. Modelos de distribución potencial actual de los pinos piñoneros endémicos de México.

P. pinceana tiene un poco más de 2 000 ha de potencial alto (Cuadro 2), estimación que difiere considerablemente de los resultados obtenidos por Aguirre y Duivenvoorden (2010), quienes modelaron la distribución de 56 especies de pinos en México, incluido *la especie mencionada*, y utilizaron el algoritmo de Máxima Entropía *MaxEnt*. Obtuvieron una superficie con aptitud alta de 15 910 750 ha y Treviño (2018), por su parte, de 1 026 800 ha.

Para *P. nelsonii*, *P. culminicola* y *P. johannis* los resultados conseguidos en este estudio fueron de 200 000 ha, 126 000 ha y 495 000, respectivamente, lo cual contrasta, con los resultados de Aguirre y Duivenvoorden (2010) quienes consignaron 11 147 600, 679 160 y 26 559 170 ha, respectivamente. Las diferencias comparativas de las áreas potenciales de los estudios pueden ser atribuidas al método aplicado en cada estudio.

Los resultados del modelado coinciden con los de Favela (2010), quien describió que *P. culminicola* se localiza a elevaciones altas de 3 000-3 650 msnm; asimismo, Contreras *et al.* (2012) confirma que los climas donde crece son fríos, con una temperatura media mensual de 10 °C durante los meses más cálidos y una precipitación anual de 401.3 mm. Romero *et al.* (2000) indican que *P. johannis* prospera en altitudes de 2 400 a 2 800 m con precipitación anual de 300 a 400 mm. Según Suzán *et al.* (2002), *P. nelsonii* se distribuye entre los 1 900 y los 2 300 msnm, en zonas con precipitación anual entre 300 y 600 mm; se ubica en pies de montaña de ambientes áridos a semiáridos (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997). Estrada *et al.* (2014) señalaron que *P. pinceana* se localiza en un intervalo altitudinal de 1 500 a 2 300 m, en lugares con una precipitación anual entre 350 y 600 mm (Martínez *et al.*, 2015). De acuerdo a Barrera *et al.* (2018) los pinos piñoneros presentan amplia distribución latitudinal y altitudinal, y ocupan distintos regímenes climáticos y edáficos debido a la interacción de diferentes factores ambientales.



Modelado de la distribución potencial bajo escenarios de cambio climático

El modelo GFDL-CM3 estimó aumentos en los intervalos de temperatura y disminución de la precipitación, con relación a los rangos actuales en la distribución potencial de los pinos piñoneros por el fenómeno del cambio climático (Cuadro 3). De acuerdo a los resultados, en el escenario RCP 4.5, el intervalo de temperatura simulado para los pinos piñoneros fue de 10 a 25 °C, mientras que para el RCP de 8.5 entre 11 y 26 °C. La precipitación en el RCP 4.5 fue de 153 a 2 584 mm y en el RCP 8.5 de 125 a 2 605 mm. Con relación a las condiciones de humedad, *P. culminicola* y *P. pinceana* son las especies con la distribución en áreas de menor precipitación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Intervalos extremos de temperatura media y precipitación anual de diferentes escenarios de cambio climático con el modelo GFDL-CM3, horizonte 2045-2069, de la distribución de las cuatro especies de pinos piñoneros.

Especie	RCP 4.5		RCP 8.5	
	T media (°C)	P anual (mm)	T media (°C)	P anual (mm)
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	10-25	224-876	11-26	185-839
<i>Pinus johannis</i> M. f. Robert	12-24	244-708	13-25	189-657
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	12-25	244-860	13-27	211-822
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	13-24	153-1 317	14-26	125-1 252

T (°C) = Temperatura; P (mm) = Precipitación

En los cuadros 4 y 5, respectivamente, se presentan la distribución potencial de las cuatro especies de piñón con el modelo GFDL-CM3 con los escenarios de cambio climático para el horizonte de futuro medio (2045-2069) RCP 4.5 y RCP 8.5. En el primero, en orden descendente de mayores superficies potenciales alta y mediana, destacan *P. pinceana*, *P. nelsonii*, *P. johannis* y *P. culminicola*. La primera especie en Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí, Tamaulipas, Hidalgo, Querétaro y Puebla. El segundo en Nuevo León, Coahuila, Zacatecas, Tamaulipas, Guanajuato, San Luis Potosí,

Chihuahua e Hidalgo. El tercero en Coahuila, Zacatecas, Nuevo León y San Luis Potosí, y el cuarto, en Nuevo León, Coahuila, Estado de México, Puebla y Zacatecas.

Cuadro 4. Superficies potenciales de especies de piñón, con escenarios de cambio climático RCP 4.5, con horizonte de futuro medio (2045-2069); en hectáreas.

Especie	Alta	Media	Baja	Total
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	20 833	141 669	4 071 883	4 234 385
<i>Pinus johannis</i> M. f. Robert	200 568	461 420	2 157 451	2 819 440
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	333 077	704 926	192 3053	2 961 056
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	415 604	1 059 232	383 5702	5 310 538

Cuadro 5. Superficies potenciales de especies de piñón, con escenarios de cambio climático RCP 8.5, con horizonte de futuro medio (2045-2069) (en hectáreas).

Especie	Alta	Media	Baja	Total
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	20 667	146 930	4 295 105	4 462 702
<i>Pinus johannis</i> M. f. Robert	213 503	506 978	2 175 017	2 895 498
<i>Pinus nelsonii</i> Shaw	332 902	726 098	96	1 059 096
<i>Pinus pinceana</i> Gordon	430 863	1 050 628	3 955 678	5 437 168

La distribución espacial de los piñoneros con este escenario, RCP 4.5, para el horizonte medio 2045-2069, de forma conjunta, mostró descensos importantes de superficie con respecto a la actual. Por ejemplo, *P. pinceana* se vería reducida hasta 85.3 % y *P. johannis* 77.4 % (Figura 3). Estos datos tienen concordancia con los resultados del trabajo de Gómez y Arriaga (2007), quienes indican que son especies vulnerables al cambio climático.



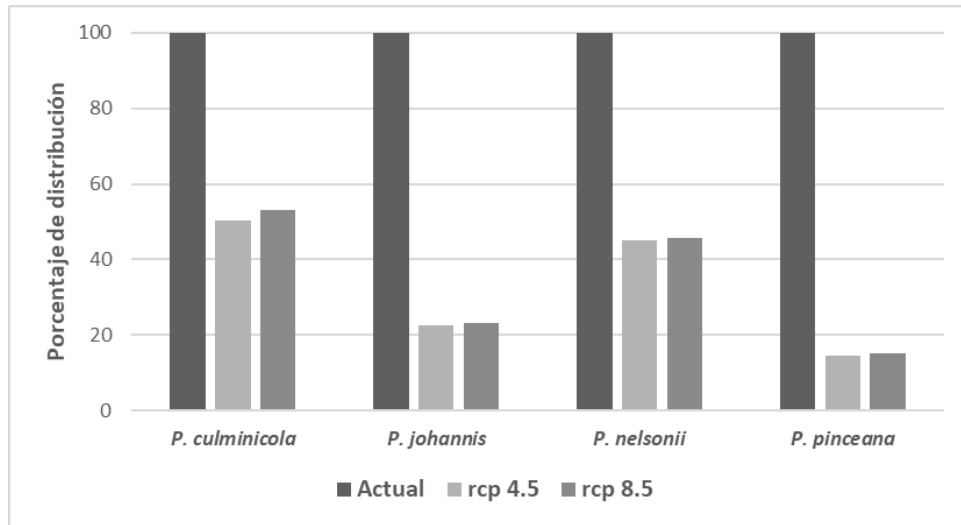


Figura 3. Cambios pronosticados de las especies de pinos piñoneros con referencia a la distribución actual potencial en el horizonte 2045-2069 considerando los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

En el escenario RCP 8.5 en orden descendente de mayores áreas potenciales alta y mediana, destacan *P. pinceana*, *P. nelsonii*, *P. johannis* y *P. culminicola*. La primera especie se localizaría fundamentalmente, por su superficie, en Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Guanajuato, San Luis Potosí, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Querétaro. La segunda en Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Tamaulipas, Guanajuato, Chihuahua, San Luis Potosí, Hidalgo y Durango. La tercera en Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Puebla y San Luis Potosí; y la cuarta, en Nuevo León, Coahuila, Estado de México, Puebla, Zacatecas y Baja California.

Las modelaciones con el escenario de emisiones RCP 8.5 sugieren pérdidas similares al escenario RCP 4.5. De forma conjunta hubo reducciones importantes con respecto al actual potencial de *P. pinceana* se vería reducida hasta 85.0 % y *P. johannis*, 76.8 % (Figura 3).



Conclusiones

Los cambios estimados en la temperatura y precipitación del modelo GFDL-CM3 RCP 4.5 y RCP 8.5 provocarán una alteración en la distribución de las especies de pinos piñoneros para el horizonte 2045-2069, de acuerdo con los resultados de este trabajo. Se espera que la distribución potencial de las especies bajo estudio sea favorecida por el cambio climático, ya que las estimaciones realizadas así lo demuestran.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Ramiro Pérez Miranda y Martín Enrique Romero Sánchez realizaron el diseño y supervisión del estudio; Antonio González Hernández, Sergio Rosales Mata y Francisco Moreno Sánchez filtraron, analizaron e interpretaron los datos; Víctor Javier Arriola Padilla brindó soporte técnico y contribuyó con aporte de ideas para la interpretación de resultados y discusión final. Todos los autores participaron en la escritura y revisión del manuscrito final.

Referencias

Aguirre, G. J. and J. F. Duivenvoorden. 2010. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 875-882.

- Araujo M., B., R. Pearson, W. Thuiller and M. Erhard. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504-1513. Doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x.
- Barrera Z., E., D. Granados S., R. L. Granados V. y M. Luna C. 2018. Caracterización de cuatro bosques de pino piñonero del estado de Zacatecas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3): 275-296. Doi:10.5154/r.rchscfa.2017.03.018.
- Berry, P. M., T. P. Dawson, P. A. Harrison and R. G. Pearson. 2002. Modeling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology and Biogeography* 11: 453-462. Doi:10.1111/j.1466-8238.2002.00304.x.
- Contreras L., J. A., D. Lazcano. and A. J. Contreras B. 2012. Herpetofauna of the Cerro El Potosi Natural Protected Area of Nuevo Leon, Mexico: Status of the Ecological and Altitudinal Distribution. *Natural Areas Journal* 32(4): 377-385. Doi:10.3375/043.032.0405.
- Davis, M. B. and R. G. Shaw. 2001. Range shifts and adaptative response to Quaternary climate change. *Science*, 292: 673-679. Doi:10.1126/science.292.5517.673.
- Elith, J., C. Graham, R. Anderson, M. Dudik and S. Ferrier. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151. Doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
- Estrada C., A. E., J. A. Villareal Q., M. M. Salinas R., C. M. Cantú A. y H. González R. 2014. Coníferas de Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Linares, NL, México.145 p.

Farjon, A. and T. B. Styles. 1997. *Pinus* (PINACEAE). Flora Neotropica, Monograph 75. Organization for Flora Neotropica. The New York Botanical Garden, New York, NY, USA. 291 p.

Favela L., S. 2010. Population variation in the endemic *Pinus culminicola* detected by RAPD. *Polibotánica*. 30: 55-67.

Fernández E., A., J. A. Zavala H., R. Romero C., A. C. Conde Á. y R. I. Trejo V. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. En: Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. INDAUTOR 04-2011-120915512800-203.

<http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/> (19 de enero de 2019).

Gernandt S., D. y J. A. Pérez de la R. 2014. Biodiversidad de *Pinophyta* (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85:126-133.

Doi:10.7550/rmb.32195.

Guevara, M., C. E. y Arroyo C. 2016. Pendiente, escala: 1:4 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (19 de enero de 2019).

Gómez M., L. and L. Arriaga. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* 21: 1545-1555. Doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2018. Modelo Digital de Elevación. Escala 1:50 000.

<http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/> (15 de octubre de 2018).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2016. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión),

escala: 1:250 000. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
(25 de octubre de 2018).

Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (INIFAP-Conabio). 1995. Edafología. Catálogo de metadatos geográficos. Escala 1:1 000 000. México, D.F., México. n/p.

Martínez A., J. G., C. Sánchez C., R. Martínez G., G. Sánchez R., I. Trejo, A. Mora O. y E. Alanis. 2015. Primer Registro de *Pinus Pinceana* (Pinaceae) para Tamaulipas. Aspectos Ecológicos y Estructurales. Botanical Sciences 93: 357-260.
Doi:10.17129/botsci.87.

Mateo R., G., M. de la Estrella, A. M. Felicísimo, J. Muñoz and A. Guisan. 2013. A new spin on a compositionalist predictive modelling framework for conservation planning: A tropical case study in Ecuador. Biological Conservation 160: 150-161.
Doi:10.1016/j.biocon.2013.01.014.

Perry, J. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, OR, USA. 231 p.

Phillips S., J. and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography 31:161-175.
Doi:10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.

Phillips S., J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190: 231-259.
Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.

Ríos, E., R. Hoogh y J. Navar. 2008. Ensayo de especies con pinos piñoneros en el nordeste de México. Revista Chapingo, Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente 14(2): 97-104.

Ríos A., A., C. Alfonso C., V. Aguirre H., G. Ángeles P., M. M. Mendoza D., V. Rodríguez R., E. Roldán F. y R. Clarck T. 2016. Abundancia y distribución del género

Pinus en Calpulálpam de Méndez, Sierra Juárez, Oaxaca. *Madera y Bosques* 22(3): 61-74. Doi:10.21829/myb.2016.2231457.

Rojas S., O. R., V. Sosa and J. F. Ornelas. 2012. Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation* 21: 2671-2690. Doi:10.1007/s10531-012-0327-x.

Romero, M., A. M. Luna. and E. García. 2000. Phenetic analysis of the Mexican Midland, pinyon pines, *Pinus cembroides* and *Pinus johannis*. *Botanical Journal of the Linnean Society* 133:181-194. Doi:10.1111/j.1095-8339.2000.tb01541.x.

Rosas C., M., D. Granados S., R. L. Granados V. y S. Esparza G. 2015. Clasificación y ordenación de bosques de pino piñonero del estado de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7 (33): 52-73. Doi.org/10.29298/rmcf.v7i33.90.

Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1^{ra}. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
(17 de enero de 2019).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (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*. 30 de diciembre de 2010. México, D.F., México. 71 p.

Suzán A., H., G. Sánchez R., J. G. Martínez A., S. Villa M. and M. Franco. 2002. Population structure of *Pinus nelsoni* Shaw, and endemic pinyon pine in Tamaulipas, Mexico. *Forest Ecology and Management* 165: 193-203.
Doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00617-X.

Tebaldi, C., K. Hayhoe, J. M. Arblaster and G. A. Meehl. 2006. Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Climatic Change* 79: 185-211. Doi:10.1007/s10584-006-9051-4.

Thuiller, W., N. Gassó, J. Pino and M. Vilá. 2012. Ecological niche and species traits: key drivers of regional plant invader assemblages. *Biological Invasions* 14: 1963-1980. Doi:10.1007/s10530-012-0206-0.

Treviño, E. J. 2018. Modelo de la distribución potencial de *Pinus pinceana* en el noreste de México. *Ciencia UNANL*. <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=7772> (20 de agosto 2018).



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