

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE SEIS CONÍFERAS ENDÉMICAS
Y EN PELIGRO DE EXTINCIÓN EN MÉXICO

Tesis

Que presenta LIBRADO SOSA DÍAZ

como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2017

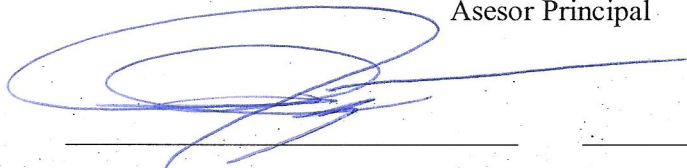
MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE SEIS
CONÍFERAS ENDÉMICAS Y EN PELIGRO DE EXTINCIÓN EN MÉXICO

Tesis

Elaborada por LIBRADO SOSA DÍAZ como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN con
la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



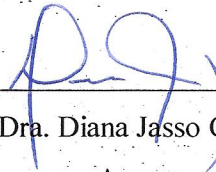
Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla
Asesor Principal



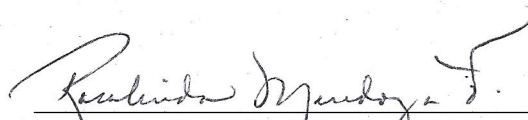
Dr. Jorge Méndez González
Asesor



Dr. Mario Alberto García Aranda
Asesor



Dra. Diana Jasso Cantú
Asesor



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Subdirectora de Posgrado
UAAAN

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la fuerza, inteligencia, sabiduría, entendimiento, fe, y sobre todo por permitirme estar y lograr lo que hasta ahora soy. Cuídame siempre.

A México, a su gente: Gracias a todos los mexicanos que con sus contribuciones hacen posible la existencia de instituciones de enseñanza pública, donde desde mi infancia me he desarrollado, crecido como persona y como profesionista. Mi más sincero agradecimiento a todos ustedes. Espero devolver con trabajo y honestidad todo lo que el país me ha brindado.

A mi Alma Mater, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, que me recibió y formó durante siete valiosos años, poniendo a mi disposición cuanto conocimiento quise aprender.

Al Dr. Jorge Méndez González, gran profesor y mejor amigo, por el apoyo, la amistad, los consejos y sobre todo la confianza que ha demostrado hacia mí. Dr. Jorge, Doña Pao: Gracias, por ser parte importante del motor que ha hecho posible este logro y sobre todo por su amistad y gran apoyo, que han sido de gran ayuda para hoy y siempre.

A mi querida esposa "Glady S. R. R.". Gracias por todo el tiempo y la tolerancia. Mis mejores pensamientos y cariño para ti.

A los mejores amigos y compañeros: Juan Carlos (Charly) y Cecilia Guadalupe (Ceci). Gracias por su amistad y que la vida les sonría siempre.

Al comité asesor: Dr. José Ángel Villarreal Quintanilla, Dr. Jorge Méndez González, Dr. Mario Alberto García Aranda y la Dra. Diana Jasso Cantú por el tiempo dedicado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto de investigación.

DEDICATORIA

A mis padres **Librado Sosa Ortíz** y **Leticia Díaz Solís** todo amor y honestidad; por darme la vida, educación, lecciones, consejos y por todo su cariño y amor; que han sido la base para conquistar un logro más, sé que nada llena el vacío que ha quedado en sus corazones, y sin embargo seguimos adelante. Les agradezco infinitamente por enseñarme a ser quien soy y por ser los cimientos que sostienen mi mundo. Los Amo, que Dios los bendiga.

“A ti, **Carol**, donde quiera que estés; porque a tus tres añitos nunca supiste lo que es leer un libro, usar una crayola, ir a la escuela y jugar con amiguitos...medicamentos, hospitales, médicos y demás y nunca pudiste ser tú misma. Siempre estarás en nuestros corazones. Gracias Dios por habernos prestado un angelito durante 3 años 6 meses 2 semanas 4 días y 12 horas, al final sabias que la llamarías junto a ti. Que Dios te bendiga siempre Carol, este logro es dedicado a ti”.

A mis hermanos **Humberto, E. Octavio, R. Misael, Leticia, A. Baruk**; a quienes espero que esto les sirva de ejemplo y puedan fijarse a sí mismos metas y logros mayores

.A mi esposa Glady Selene. R. R., por su cariño y apoyo siempre indispensable. Gracias, porque cada camisa planchada representa la persona que soy. A mis niños que son siempre la fuerza que me hacen mirar hacia el futuro.

Mis más sinceros agradecimientos hacia todas las personas involucradas y que hacen todo en la vida para que yo pueda alcanzar mis metas, por motivarme y darme la mano cuando lo necesito, dedico a todos ustedes el objetivo logrado.

Índice General

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
Índice de Cuadros	vi
Índice de Figuras.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	2
Hipótesis	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
El Género <i>Pinus</i> en México	3
Problemática de los Bosques de México	3
Distribución de Especies	4
Modelos de Distribución de Especies.....	4
Evaluación de Modelos de Distribución.....	5
Perfil Bioclimático	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Área de Estudio y Datos de Presencia de Especies	7
Variables para Modelación	7
Generación de Modelos de Distribución Potencial	8
Área Potencial y Amplitud Ecológica	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Ajuste y Validación de Modelos de Distribución	9
Distribución Potencial	10
Variables que Predicen la Distribución de Especies	12
Usos de Suelo en Área Potencial	15
CONCLUSIONES	16
REFERENCIAS.....	17

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Valores de ajuste de modelos de distribución potencial para <i>Pinus culminicola</i> Andresen et Beaman (<i>Pcu</i>), <i>P. jaliscana</i> Pérez de la Rosa (<i>Pja</i>), <i>P. johannis</i> Rob.-Pass. (<i>Pjo</i>), <i>P. maximartinezii</i> Rzed. (<i>Pma</i>), <i>P. nelsonii</i> Shaw (<i>Pne</i>) y <i>P. pinceana</i> Gordon (<i>Ppi</i>).....	9
Cuadro 2: Intervalo de variación de seis variables de mayor importancia en modelos de distribución potencial de seis especies de coníferas endémicas de México	14
Cuadro 3: Principales usos de suelo y vegetación en los que se distribuye el área de distribución potencial de <i>Pinus culminicola</i> Andresen et Beaman (<i>Pcu</i>), <i>Pinus jaliscana</i> Pérez de la Rosa (<i>Pja</i>), <i>Pinus johannis</i> Rob.-Pass. (<i>Pjo</i>), <i>Pinus maximartinezii</i> Rzed. (<i>Pma</i>), <i>Pinus nelsonii</i> Shaw (<i>Pne</i>) y <i>Pinus pinceana</i> Gordon (<i>Ppi</i>).....	15

Índice de Figuras

Figura 1: Distribución potencial de <i>Pinus culminicola</i> Andresen et Beaman (A), <i>Pinus jaliscana</i> Pérez de la Rosa (B), <i>Pinus johannis</i> Rob.-Pass. (C), <i>Pinus maximartinezii</i> Rzed. (D), <i>Pinus nelsonii</i> Shaw (E) y <i>Pinus pinceana</i> Gordon (F)	11
---	----

RESUMEN

MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE SEIS CONÍFERAS EN DÉMICAS
Y EN PELIGRO DE EXTINCIÓN EN MÉXICO

POR

LIBRADO SOSA DÍAZ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ ÁNGEL VILLARREAL QUINTANILLA-ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2017

México posee una gran diversidad florística y los pinos piñoneros representan componentes estructurales importantes de las comunidades vegetales, por lo que resulta crucial conocer aspectos básicos sobre sus preferencias climáticas, en especial si éstas se enlistan en algún status de conservación. El objetivo de este estudio fue modelar, la distribución potencial de *Pinus culminicola*, *P. jaliscana*, *P. johannis*, *P. maximartinezii*, *P. nelsonii* y *P. pinceana*, en México. Se extrajeron registros de presencia de colecciones digitales (REMIB, GBIF), así como del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2009-2014). Se generaron modelos de distribución mediante MaxEnt (Mx), con variables edafológicas, topográficas y climáticas (mensuales y estacionales) cuya discriminación, previa a la modelación se realizó mediante análisis factorial (Af), modelos preliminares con Mx y criterios estadísticos (Ce). Los modelos se validaron con registros de presencias independientes. El modelo de *Pinus pinceana* tuvo el menor valor de AUC (0.97) y la mayor área potencial (167,314.30 km²), mientras que las especies más restringidas (*Pinus culminicola* y *P. maximartinezii*) fueron las que presentaron menor área (423.30 y 11,516.66 km²) pero mayores valores de AUC (0.99 en ambas especies), por lo que presentan mayor riesgo de extinción. La distribución potencial de *Pinus jaliscana* y *P. nelsonii* está directamente relacionada con precipitación, *P. maximartinezii* y *P. pinceana* con temperaturas máximas; *P. culminicola* y *P. johannis* con temperaturas mínimas. El tipo de suelo es importante en modelos de distribución de especies.

Palabras clave: hábitat potencial, *Pinus*, MaxEnt, superficies climáticas, temperatura, precipitación.

ABSTRACT

POTENTIAL DISTRIBUTION MODELS OF SIX MEXICAN ENDEMIC AND
ENDANGERED CONIFER SPECIES

BY

LIBRADO SOSA DÍAZ

MASTER OF SCIENCE PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ ÁNGEL VILLARREAL QUINTANILLA-ADVISOR-

SALTILLO, COAHUILA

DECEMBER 2017

Mexico has a great floristic diversity and the pinon pines are an important structural component of the plant communities, thus is crucial to know basic aspects of the climatic preferences, especially if this species are under conservation status. The purpose of this study was to modelate the potential distribution of *Pinus culminicola*, *P. jaliscana*, *P. maximartinezii*, *P. nelsonii* and *P. pinceana* in México. Records of presence were obtained from digital collections (REMIB, GBIF) and the Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2009-2014). The MaxEnt (Mx) was used to generate models of distribution using edaphologic, topographic and climatic variables (monthly and seasonally) with previous discrimination to the modelation was based in a factorial analysis (Af), preliminary models Mx and Statistical criteria (Ce). The models were validated with information taken from independent presences. The lower AUC value was 0.97 corresponding to *Pinus pinceana*, a species with the largest potential surface (167,314.30 km²), while the most restricted species (*P. culminicola* and *P. maximartinezii*) showed the shorter area (423.30 y 11,516.66 km²) but with highest AUC values (0.99 for both species). *Pinus culminicola* and *P. maximartinezii* showed the highest extinction risk, due the small potential surface predicted. The potential distribution of *Pinus jaliscana* and *P. nelsonii* is directly related wit precipitation, while *P. maximartinezii* and *P. pinceana* with high temperatures, and *P. culminicola* and *P. johannis* with low temperatures. Soil type is important in distribution species models.

Key words: Potential habitat, *Pinus*, MaxEnt, climatic surfaces, temperature, precipitation.

INTRODUCCIÓN

México es una de las regiones de Norteamérica con mayor diversidad de coníferas (Ávila *et al.*, 2014), con cuatro familias (Cupressaceae, Pinaceae, Podocarpaceae y Taxaceae) y 94 especies distribuyéndose naturalmente en el país, y de las cuales 30 pertenecientes a la familia Pinaceae son endémicas (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014), cuya importancia de conservación radica en su endemismo, abundancia y dominancia.

Es incierta la situación actual de los bosques coníferas de México, Aguirre y Duivenvoorden (2010) afirman que las estrategias actuales no protegen adecuadamente al género *Pinus*, además con la constante presión de incendios, plagas y enfermedades, perturbaciones antropogénicas y cambio climático, el riesgo de extinción se acentúa. Algunos estudios sobre geografía para la conservación de especies de coníferas han analizado patrones de riqueza y la distribución de comunidades vegetales a diferentes escalas geográficas (Villaseñor y Téllez-Valdés, 2004); además de los trabajos de Leal-Nares *et al.*, (2012), Pérez *et al.*, (2013), Ávila *et al.*, (2014) y Cruz-Cárdenas *et al.*, (2016) a escala local, mientras que Téllez *et al.*, (2004) y Gutiérrez y Trejo (2014) a nivel nacional y más allá de estos límites se puede mencionar a Zonneveld *et al.*, (2009) y Sáenz-Romero *et al.*, (2015).

Los modelos de distribución de especies se desarrollan bajo técnicas descriptivas, mixtas y discriminantes (Mateo *et al.*, 2011), en las últimas destaca el algoritmo de Máxima Entropía (Phillips *et al.*, 2006), que ha sido nombrado como uno de los mejores (Elith *et al.*, 2011) y cuyas ventajas expuestas por Phillips *et al.*, (2006) logran su uso en áreas de conservación como la ecología y biogeografía (Araújo y Guisan, 2006). Dichos modelos se pueden definir como la representación parcial de una realidad (Mateo *et al.*, 2011), ayudando a señalar sitios con condiciones ambientales requeridas por las especies (Villaseñor y Téllez-Valdés, 2004), basándose para ello en ocurrencias geográficas y variables que caracterizan el ambiente (Hernandez *et al.*, 2008).

Se desconoce actualmente la distribución potencial de muchas especies de coníferas sobre el territorio nacional, además de su relación con el clima y preferencias ecológicas, lo cual es necesario si se desea asegurar su conservación (Leal-Nares *et al.*, 2012) o manejo (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014). Dado lo anterior, en este trabajo

se plantea desarrollar modelos para conocer el potencial de distribución geográfica de *Pinus culminicola* Andresen et Beaman, *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa, *Pinus johannis* Rob.-Pass., *Pinus maximartinezii* Rzed., *Pinus nelsonii* Shaw y *Pinus pinceana* Gordon, y conocer su perfil bioclimático, según la NOM-059 (SEMARNAT, 2010) estas especies están incluidas en alguna categoría de riesgo, además de ser endémicas con distribución restringida, por lo que se consideran organismos vulnerables a procesos de extinción, tal y como fue el caso de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. var. *manzanoi* Martínez, la cual no se ha observado desde más de siete décadas (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014).

Objetivo

Determinar la distribución potencial de *Pinus culminicola*, *Pinus jaliscana*, *Pinus johannis*, *Pinus maximartinezii*, *Pinus nelsonii* y *Pinus pinceana* en México, usando variables climáticas y topográficas y el software de Máxima Entropía (MaxEnt).

Hipótesis

Es posible determinar la distribución potencial de coníferas endémicas de México, usando variables climáticas mensuales y estacionales.

REVISIÓN DE LITERATURA

El Género *Pinus* en México

Los pinos son importantes dada su dominancia en las comunidades vegetales del hemisferio norte, además del valor económico que adquieren al proveer diversos productos y servicios y donde México representa una zona de especiación del género *Pinus*, con alrededor del 40 % de las especies del género reconocidas a nivel mundial (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014), cuyas estrategias de conservación actuales no aseguran su protección (Aguirre y Duivenvoorden, 2010).

Gernandt y Pérez de la Rosa (2014) aseguran que de las coníferas mencionadas para México, 30 son de carácter endémico, sin embargo en la actualidad, solo 20 especies del género *Pinus* se encuentran incluidas en alguna categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010, de las cuales siete, se encuentra restringidas a no más de tres estados, y sin embargo existen especies que igualmente presentan una distribución muy restringida (*Pinus georginae*, *P. luzmariae*, *P. radiata* var. *binata* y *P. yecorensis*) y no están incluidas en dicha norma (Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014).

Problemática de los Bosques de México

Los bosques de México se encuentran bajo constante presión por diversos factores como lo son las plagas y enfermedades, incendios, sobre aprovechamientos, tala clandestina y por el fenómeno global de cambio climático, aunado al aumento en la demanda diversos insumos y productos para su desarrollo económico y social, producen cambios en los paisajes y sistemas naturales (Pérez *et al.*, 2013).

Al respecto, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2002), asegura que muchas especies se desplazarán a latitudes o altitudes mayores respecto de su hábitat actual, ocasionando una reducción en su área de distribución como resultado de cambios en el clima (Gutiérrez y Trejo, 2014), haciéndose más evidente con las especies de altitudes altas. Una especie con las características mencionadas es *Pinus hartwegii* la cual se distribuye en climas sub alpinos de las zonas montañosas más altas del país (Farjon *et al.*, 1997) y que en el estado de Michoacán disminuye su área de distribución hasta un 75 % bajo escenarios climáticos futuros (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

Distribución de Especies

En algunos casos los estudios biogeográficos de taxa mexicanos se han basado en límites políticos (Contreras *et al.*, 2010), sin embargo, esto no necesariamente tiene una implicación real en sobre su distribución, contrariamente a los factores ambientales, que influyen de manera directa o indirecta en la geografía de las especies (Guisan y Zimmermann, 2000). La distribución de especies obedece a procesos complejos donde las relaciones bióticas tienen una influencia importante (Mateo *et al.*, 2011), puesto que al alcanzar los límites de las variables ambientales tolerados por las especies, estas no pueden llevar a cabo su ciclo de vida óptimo (Gutiérrez y Trejo *et al.*, 2014). En México la documentación sobre la distribución de las especies aún se encuentra poco desarrollada (Villaseñor y Téllez-Valdez, 2004).

Modelos de Distribución de Especies

Los modelos de distribución de especies son representaciones cartográficas de la favorabilidad de un espacio para la presencia de una especie en función de las variables ambientales (Mateo *et al.*, 2011), donde el propósito es predecir la idoneidad del medio ambiente para la especie en función de las características del ambiente (Phillips *et al.*, 2006). La idoneidad es la relación matemática o estadística entre la distribución real conocida y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores (Mateo *et al.*, 2011).

En México los modelos de distribución de especies se han aplicado con diferentes objetivos, escalas y especies; a gran escala se han realizado con *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. para conocer distribución futura (Sáenz-Romero *et al.*, 2015); Aguirre y Duivenvoorden, (2010) modelaron 56 especies de *Pinus* para conocer su grado de protección con estrategias actuales de conservación; Martínez-Méndez *et al.*, (2016) estudiaron al género *Abies* para establecer similitudes entre el nicho ecológico de las especies que componen el género; Gutiérrez y Trejo, (2014) analizaron la distribución de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. hartwegii* Lindl., *Abies hickelii* Flous y Gausson, *Quercus laurina* Bonpl. y *Q. ocoteifolia* Liebm. para conocer el efecto del cambio climático, al igual que Zonneveld *et al.*, (2009) con *Pinus patula* Schltdl. et

Cham. y *P. tecunumanii* F. Schwerdtfex Eguiluz & J.P. Perry en México y América central.

A escala local, se ha estimado la distribución de especies género *Abies*, *Pinus*, *Pseudotsuga* presentes en Puebla (Ramos-Dorantes *et al.*, 2017), especies invasoras (i. e. *Tamarix ramosissima* Ledeb. y *Atriplex semibaccata* R. Br.) en Baja California (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014); Ávila *et al.*, (2014) generaron un modelo para *Pinus herreare* Martínez en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila (occidente de Jalisco); en Michoacán se generaron modelos bajo escenarios de cambio climático para dos especies de *Abies* y 10 de *Pinus* (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016), al igual que Pérez *et al.*, (2013) con *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* Lindl. en el estado de México; mientras que para *Pinus martinezii* E. Larsen, Leal-Nares *et al.*, (2012) predijeron su distribución en la cuenca de Cuitzeo (Michoacán).

Evaluación de Modelos de Distribución

La mejor forma de evaluar los modelos de distribución de especies se realiza comparando las predicciones contra un conjunto de presencias independiente a la construcción de los mismos (Pearson *et al.*, 2007) o creando matrices de confusión donde se registran las localidades verdaderas clasificadas como presencias por el modelo (Allouche *et al.*, 2006), aunque en la mayoría de casos la evaluación se basa en otras técnicas, como lo son las curvas ROC (*Operating Receiver Characteristic*), donde específicamente se analiza el coeficiente de Área Bajo la Curva (AUC) (Phillips *et al.*, 2006), considerando que el modelo es útil para predecir distribución cuando este valor sea mayor a 0.75 (Elith, 2000) y mejorando su desempeño a medida que se acerca a uno. En algunos trabajos se ha dividido los datos de presencia en porcentajes variables para el entrenamiento y evaluación del modelo, dando mayor prioridad (mayor porcentaje de presencias) al entrenamiento. Dichas particiones están en función de la cantidad de presencias disponibles y el criterio del investigador, así pues, Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, (2014) destinaron el 25 % de 13 registros para evaluación de modelos de distribución; Ramos-Dorantes *et al.*, (2017) emplearon uno y cuatro registros para evaluación y entrenamiento respectivamente; 75 % de 17 registros en promedio fueron usados para entrenamiento de modelos de distribución (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

Perfil Bioclimático

Los perfiles bioclimáticos proporcionan información que permite evaluar su afinidad respecto a los factores ambientales y hace posible medir su probabilidad de presencia en el espacio geográfico (Leal-Nares *et al.*, 2012), a la vez que ayudan a indicar sitios potenciales para hacer exploraciones directas en busca de nuevas poblaciones, determinar el comportamiento de las especies ante alteraciones (principalmente antrópicas), brindar información sobre sitios prioritarios a conservar (Hernández *et al.*, 2008), cuantificar diferencias entre nicho ecológico de especies y finalmente a definir los límites del área geográfica que podría ocupar una especie (Villaseñor y Téllez-Valdés, 2004).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio y Datos de Presencia de Especies

El estudio se realizó en México, el cual presenta climas cálidos húmedos, secos, templados y fríos (García, 1998), precipitación promedio anual de 777 mm y temperatura media anual entre 12 y 22 °C (Méndez *et al.*, 2008). Las especies estudiadas fueron: *Pinus culminicola*, *P. jaliscana*, *P. johannis*, *P. maximartinezii*, *P. nelsonii* y *P. pinceana*, para las que se obtuvieron 43, 57, 38, 21, 87 y 133 coordenadas geográficas de presencia provenientes de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB, 2017), Facilitador Global de Información de Biodiversidad (GBIF, 2017) y del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (datos proporcionados por la Comisión Nacional Forestal) y para los que se verificó que concordaran con la distribución conocida de cada especie. Se usó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para eliminar registros fuera de zonas boscosas y datos duplicados. En promedio se excluyó aleatoriamente el 20 % de los registros de presencia de las especies para realizar una validación externa (VE) (Pearson *et al.*, 2007) y verificar el desempeño de los modelos de distribución (MDP).

Variables para Modelación

Las variables (superficies) usadas para generar los MDP incluyeron coberturas climáticas (mensuales y estacionales) generadas aquí para tal fin, topográficas (altitud, exposición y pendiente del terreno) derivadas del modelo digital de elevación (INEGI, 2013) y tipo de suelo (INIFAP-CONABIO, 2001), a una resolución aproximada de 1km². Las variables climáticas seleccionadas para cada especie, fueron las que presentaron: 1) cargas extremas en análisis factorial basado en componentes principales (Af); 2) mayor ganancia en modelos preliminares de distribución potencial realizados con MaxEnt (Mx) y 3) correlación menor a 0.7, determinada mediante el paquete fuzzySim (Barbosa *et al.*, 2015) de R (Ce).

Generación de Modelos de Distribución Potencial

Los MDP de tipo logístico se generaron y evaluaron desde el programa R (R CoreTeam, 2017) con ayuda de MaxEnt v. 3.3.3k (Maximum Entropy Species Distribution Modeling) (Phillips *et al.*, 2006), y el paquete *dismo* (Hijmans *et al.*, 2016). Para seleccionar un modelo de cada especie, se consideró el valor más alto del estadístico AUC (*Area Under Curve*) (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014), el número de registros de VE (Pearson *et al.*, 2007) con probabilidad de presencia (PP) predicha mayor a 0.6, asumiendo que el mejor modelo es aquel que predice probabilidades más altas para dichas localidades. El área de distribución potencial se definió por arriba del estadístico *True Skiller Statistic* (TSS), sugerido y discutido por Allouche *et al.*, (2006).

Variables Importantes y uso de Suelo

Se utilizó la prueba de Jackknife (Phillips *et al.*, 2006) para determinar cuáles son las variables de importancia que influyen en la distribución de cada especie, basándose en las curvas de respuesta de los MDP para describir el efecto de la variable sobre la probabilidad de presencia. El modelo seleccionado se proyectó al espacio geográfico y se calculó el área de distribución potencial mediante un SIG. El área de distribución por arriba del umbral TSS se vectorizó e intersectó con vectores de uso de suelo y vegetación para conocer el tipo de vegetación sobre el cual se distribuye el área potencial de cada especie.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste y Validación de Modelos de Distribución

De acuerdo con Elith (2000), modelos con valores de AUC de 0.75 son útiles para predecir la distribución de especies, en ese sentido, los mayores AUC (0.99, Cuadro 1) fueron para los taxones más restringidos geográficamente (*Pinus culminicola*, *P. maximartinezii* y *Pinus jaliscana*), cuyo hábitat idóneo se predice mejor (Allouche *et al.*, 2006). Aguirre y Duivenvoorden, (2010) generaron modelos de distribución para las mismas especies (excepto *Pinus johannis*), obteniendo menores AUC para *P. nelsonii* y *P. pinceana* (0.93 y 0.83) mientras que en este trabajo fueron 0.99 y 0.97 (Cuadro 1), además de mayor área potencial para todos los taxones (50 % en promedio para todas las especies), lo cual es consecuencia del uso de variables climáticas que representan promedios anuales (como las usadas por los autores), mismas que generalizan el comportamiento del clima durante el año, a diferencia del variables mensuales que pueden representar los requerimientos específicos de cada especie y por consecuencia reducir el área potencial de las especies.

Cuadro 1: Valores de ajuste de modelos de distribución potencial para *Pinus culminicola* Andresen et Beaman (*Pcu*), *P. jaliscana* Pérez de la Rosa (*Pja*), *P. johannis* Rob.-Pass. (*Pjo*), *P. maximartinezii* Rzed. (*Pma*), *P. nelsonii* Shaw (*Pne*) y *P. pinceana* Gordon (*Ppi*).

Sp	Mv	M _{AUC}		DE _{AUC}		M _{TSS}		PR _{v0.6} (%)		Área (km ²)	
		P	Ms	P	Ms	P	Ms	P	Ms	P	Ms
<i>Pcu</i>	Mx	0.99	0.99	0.00	0.00	0.32	0.32	31.11	33.33	336.59	423.30
<i>Pja</i>	Af	0.99	0.99	0.00	0.00	0.06	0.03	54.44	55.56	55,132.96	59,007.80
<i>Pjo</i>	Mx	0.97	0.98	0.02	0.02	0.06	0.04	72.86	85.71	110,128.67	79,518.09
<i>Pma</i>	Mx	0.99	0.99	0.01	0.01	0.24	0.33	70.00	100.00	130,57.41	11,516.66
<i>Pne</i>	Af	0.99	0.99	0.01	0.00	0.10	0.11	61.33	60.00	37,308.58	28,901.99
<i>Ppi</i>	Af	0.97	0.97	0.01	0.01	0.11	0.10	43.04	47.83	170,123.44	167,314.30

Sp=especie; Mv=método de selección de variables; Mx=variables seleccionadas mediante modelos preliminares de MaxEnt; Af=variables seleccionadas mediante análisis factorial; P=promedio de los modelos generados; Ms=modelo seleccionado; M_{AUC}=media del estadístico AUC; DE_{AUC}=desviación estándar del AUC; M_{TSS}=media del estadístico TSS; PR_{v0.6}=porcentaje de registros de validación con probabilidad predicha mayor a 0.6.

Los modelos de *Pinus maximartinezii* y *P. johannis* predijeron probabilidades de presencia superiores a 0.6 en más del 85 % de las localidades y menor al 50 % para *P. culminicola* y *P. pinceana*, así mismo para estas dos especies se encontró la menor (423 km²) y mayor (167,314.30 km²) superficie potencial (Cuadro 1).

Distribución Potencial

En la Sierra Madre Oriental (SMO), se predice hábitat potencial para cuatro de las seis especies estudiadas; la más restringida de ellas es *Pinus culminicola*, cuya área potencial se observa en zonas elevadas entre Coahuila y Nuevo León (>2900 msnm) además de otros sitios en los límites de Tamaulipas y Nuevo León (Fig. 1A) y que a su vez representan zonas de vegetación subalpina donde se desarrollan las poblaciones de esta especie (McDonald, 1990; García y González, 1991; Jiménez, 2005). Sobre la SMO también se ha reportado a *Pinus nelsonii* (Mirov *et al.*, 1962; Zavarin y Snajberk, 1987), en zonas abarcadas por el modelo generado para esta especie (Fig. 1E), lo mismo para *Pinus johannis* cuya predicción de espacio geográfico potencial coincide con lo reportado por Romero *et al.*, (2000), en áreas dispersas de San Luis Potosí, Zacatecas, Coahuila y Nuevo León (Fig. 1C).

La especie *Pinus pinceana* presenta las contribuciones más recientes en cuanto a su distribución (Zavarin y Snajberk, 1987; Córdoba *et al.*, 2008; Villarreal *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2015), los cuales mencionan poblaciones aisladas, sin embargo el modelo establece que existen condiciones favorables para que esta especie pueda poblar la SMO de forma continua (Fig. 1F), al señalar alta probabilidad de ocurrencia desde el norte de Puebla y hasta el norte de Coahuila.

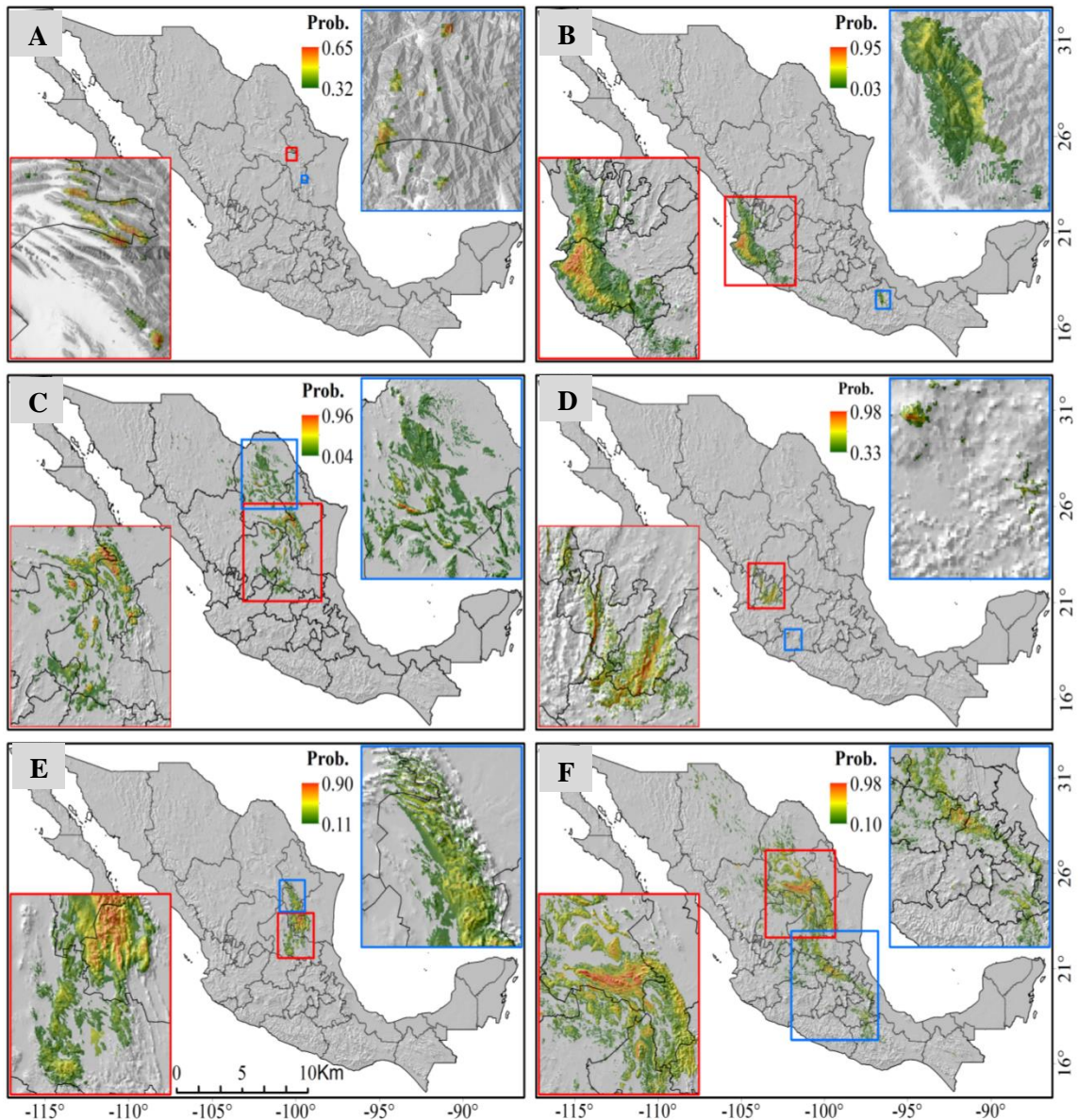


Figura 1: Distribución potencial de *Pinus culminicola* Andresen et Beaman (A), *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa (B), *Pinus johannis* Rob.-Pass. (C), *Pinus maximartinezii* Rzed. (D), *Pinus nelsonii* Shaw (E) y *Pinus pinceana* Gordon (F).

En la zona donde convergen la Sierra Madre Occidental y la Faja volcánica Transmexicana se encuentran las zonas favorables para *Pinus jaliscana*, en la Sierra de Jalisco (Farjon *et al.*, 1997; Dvorak *et al.*, 1998; Gernandt y Pérez de la Rosa, 2014), Nayarit y una zona al norte de Oaxaca con probabilidad de hasta 0.55 (Fig. 1B), destacando que las especies de pino de la sierra de Nayarit son las mismas que se

presentan asociadas a las poblaciones conocidas de esta especie (Farjon *et al.*, 1997; Dvorak *et al.*, 1998; CONAFOR, 2016), lo que da indicio de la similitud ecológica y climática que hizo al software MaxEnt predecir dichos sitios como hábitat potencial.

El pino azul (*Pinus maximartinezii*) presenta áreas favorables en zonas aledañas a la población de Juchipila, Zacatecas (Farjon *et al.*, 1997) y la Muralla, (Durango) descrita por González *et al.*, (2011) que son la únicas poblaciones actualmente conocidas, entre ellas se predice probabilidad de presencia de hasta 0.90 (Fig. 1D). En general, para todos los pinos estudiados, MaxEnt predice sitios que cumplen con las condiciones adecuadas para cada especie (Pearson *et al.*, 2007) y áreas prioritarias en caso de requerir la planeación de estrategias de conservación de especies endémicas (Hernandez *et al.*, 2008) que serían los sitios donde se observan mayores valores de probabilidad (Fig. 1 ABCDEF).

Variables que Predicen la Distribución de Especies

Las variables de modelación que mejor se ajustaron a los registros de presencia de *Pinus jaliscana*, *P. nelsonii* y *P. pinceana* fueron las seleccionadas mediante análisis factorial, para el resto de las especies mediante modelos preliminares de MaxEnt (Cuadro 1). La temperatura tuvo una contribución media de 57 % en los modelos de *Pinus culminicola*, *P. johannis*, *P. maximartinezii* y *P. pinceana*; las variables de precipitación el 50 % para *P. jaliscana*, a la vez que las variables topográficas aportaron el 31 % en el modelo de *P. nelsonii*. Todas las especies estudiadas difieren en su sensibilidad climática (Cuadro 2).

El tipo de suelo (aportó en promedio 15 % a la construcción de los modelos) no parece tener influencia directa sobre la distribución de las especies estudiadas puesto que no es la variable que individualmente aporta mayor ganancia a los modelos, sin embargo cuando esta es omitida el desempeño de los mismos decrece drásticamente, lo que indicaría que las interacciones suelo-clima son esenciales para las especies, lo que reafirman Córdoba *et al.*, (2008) al establecer que el tipo de suelo influye significativamente en el crecimiento de *P. pinceana*. Topográficamente, la pendiente es la variable más importante (excepto para *Pinus jaliscana*), Romero *et al.*, (2000) mencionan que *Pinus johannis* prefiere sitios con exposición norte y noreste, sin

embargo la distribución de la especie está más condicionada a las condiciones climáticas (Cuadro 2).

El número de días con temperaturas menores a 10 °C de septiembre (N10₀₉) y la temperatura mínima del mes de junio (Tii₀₆) favorecen la distribución de *Pinus culminicola*, mientras que Flores *et al.*, (2013), reportan que la temperatura del mes más frío es importante para esta especie (Cuadro 2), sucediendo lo contrario para *P. jaliscana*, donde los días con temperaturas < 0 °C durante el verano repercuten negativamente en su distribución (Cuadro 2).

La probabilidad de presencia de *Pinus pinceana* disminuye en presencia de temperaturas mayores a 40 °C (N40₁₀) durante octubre (Cuadro 2), al igual que *P. johannis* que es poco tolerante a temperaturas altas (Romero *et al.*, 2000), concordando con lo observado en este trabajo puesto que la distribución de esta especie está más condicionada a temperaturas bajas (St0_v, St0_o y St0_i) que a temperaturas máximas (Cuadro 2).

Por otro lado, Flores *et al.*, (2013) citan la escasez de precipitación como factor importante para los pinos piñoneros, lo que se afirma en este trabajo puesto que el número de días sin precipitación de verano (Dsp_v) fue una de las variables más importantes para *Pinus johannis* y *P. nelsonii* (Cuadro 2), mientras que el número de días con lluvia del mes de julio (Dcp₀₇) es importante para *P. maximartinezii*, *P. culminicola* y *P. nelsonii* (Cuadro 2). La lluvia (Ptm₀₉ y P10₁₀) es también una condicionante importante para *Pinus jaliscana*, para la cual Dvorak *et al.*, (1998) reportan menos de 30 mm de noviembre a mayo, siendo que la precipitación promedio de febrero (Ppm₀₂) para esta especie está dentro del rango reportado por los autores, pero en septiembre y octubre (Ptm₀₉ y P10₁₀) la especie necesita hasta 284 mm de lluvia (Cuadro 2).

Cuadro 2: Intervalo de variación de seis variables de mayor importancia en modelos de distribución potencial de seis especies de coníferas endémicas de México

<i>Pinus culminicola</i> Andresen et Beaman			<i>Pinus jaliscana</i> Pérez de la Rosa			<i>Pinus johannis</i> Rob.-Pass.		
Var	Min	Max	Var	Min	Max	Var	Min	Max
N10 ₀₉	9.43	19.01	P10 ₁₀	37.40	102.18	N<0 _v	0.01	0.20
Elev	2915.00	3651.00	Ppm ₀₂	5.91	8.96	St0 _v	-0.46	0.00
Tii ₀₆	5.25	8.07	Ts	A, R, H, J, G		St0 _i	-6.21	-0.83
N10 ₀₇	24.72	29.21	N35 ₁₂	0.13	0.79	St0 _o	-3.81	-0.52
Pend	2.00	25.00	Ptm ₀₉	132.12	284.62	Dsp _v	69.68	80.04
Dcp ₀₇	5.44	5.95	Tma ₁₁	26.27	31.55	Ts	T, A, B, K, H	
<i>Pinus maximartinezii</i> Rzed.			<i>Pinus nelsonii</i> Shaw			<i>Pinus pinceana</i> Gordon		
Dcp ₀₇	17.32	18.02	Dcp ₀₇	4.19	8.58	N40 ₁₀	-0.01	0.05
Pam ₀₃	2.39	2.48	Dsp ₀₇	22.38	26.69	Tii ₁₁	-1.57	3.97
Ts	A, T, L		Ptm ₀₉	65.27	175.34	N35 ₁₀	-0.05	1.82
T40 ₀₇	10.71	23.54	Ts	T, H, B, G, L		Tmi ₀₉	9.74	17.57
N30 ₀₈	8.59	14.69	P05 ₀₉	55.06	170.44	Ts	T, B, H, J, A	
Pend	2.00	21.00	N40 ₀₃	0.07	0.32	Pend	0.00	25.00

Var=variable; Mín y Máx=valor mínimo y máximo de la variable donde se predice la especie; Ts=tipo de suelo; A=acrisol; B=cambisol; G=gleysol; H=feozem; J=fluvisol; K=castañozem; L=luvisol; T=andosol; R=regosol; N10= número de días con temperatura mayor a 10 (°C); Ptm=precipitación total del mes i (mm); P10=precipitación de días con lluvias \geq a 10 mm; Ppm=precipitación promedio ponderada en número de días con lluvia del mes i (mm); N35=número de días del mes i con temperatura \geq 35 °C (n); Tma=temperatura media del mes i (°C); Dsp=número de días sin lluvia del mes i; N<0=número de días con temperaturas \leq a cero (n); St0=suma de las temperaturas \leq a cero (°C); Pam=precipitación máxima diaria del mes i (mm); Dcp=número de días con lluvia del mes i; N30=número de días del mes i con temperatura \geq 30 °C (n); T40=temperatura media del mes i con número de días con temperaturas mayores a 40 grados (°C); P05=precipitación de días con lluvias \geq a 5 mm; N40=número de días del mes i con temperatura \geq 40 °C (n); Tmi=temperatura media de las mínimas del mes (°C); Tii=temperatura mínima de las mínimas del mes (°C); 01...12=enero...diciembre.

Usos de Suelo en Área Potencial

Los bosques de coníferas así como su vegetación secundaria, ocupan cerca del 50 % del área potencial de *Pinus culminicola*, *P. jaliscana* y *P. maximartinezii*, mientras que para el resto de las especies en promedio el 50 % de la superficie potencial lo ocupan matorrales y vegetación asociada a estos (Cuadro 3), como para *P. nelsonii* donde la mayor área potencial se distribuye sobre matorrales, condición a la cual esta especie de pino se encuentra bien adaptada (Farjón *et al.*, 1997).

Cuadro 3: Principales usos de suelo y vegetación en los que se distribuye el área de distribución potencial de *Pinus culminicola* Andresen et Beaman (*Pcu*), *Pinus jaliscana* Pérez de la Rosa (*Pja*), *Pinus johannis* Rob.-Pass. (*Pjo*), *Pinus maximartinezii* Rzed. (*Pma*), *Pinus nelsonii* Shaw (*Pne*) y *Pinus pinceana* Gordon (*Ppi*).

Usv	<i>Pcu</i>		<i>Pja</i>		<i>Pjo</i>		<i>Pma</i>		<i>Pne</i>		<i>Ppi</i>	
	A (km ²)	P (%)	A (km ²)	P (%)	A (km ²)	P (%)	A (km ²)	P (%)	A (km ²)	P (%)	A (km ²)	P (%)
I	401.9	94.8	27388.2	46.0	16308.6	20.4	6087.9	52.5	10541.3	36.4	38016.2	22.6
II	5.8	1.4	170.2	0.3	49607.4	62.2	0.2	0.0	14141.1	48.9	89680.8	53.4
III	14.1	3.3	6055.6	10.2	7564.7	9.5	1276.5	11.0	936.3	3.2	17123.2	10.2
IV	0.0	0.0	16863.9	28.3	4.1	0.0	2245.0	19.4	120.5	0.4	3436.0	2.0
V	2.1	0.5	8417.3	14.1	5485.2	6.9	1933.7	16.7	2883.0	10.0	17885.5	10.7
VI	0.0	0.0	638.4	1.1	784.5	1.0	42.5	0.4	311.4	1.1	1754.2	1.0

Usv=uso de suelo y vegetación; I=bosques de coníferas y su vegetación secundaria; II=matorrales y su vegetación secundaria; III=praderas y pastizales; VI=selvas y su vegetación secundaria; V=agricultura de algún tipo; VI=otros usos de suelo; A=área de distribución potencial en km²; P=porcentaje de área potencial distribuida sobre el uso de suelo I...VI.

El bosque dominado por pino-encino domina el entorno de *Pinus maximartinezii* (Zavarín y Snajberk, 1987; González *et al.*, 2011), que es tipo de vegetación donde se distribuye la mayor superficie potencial para la especie (Cuadro 3), además los mismos autores mencionan que existen similitudes morfológicas y químicas entre *P. pinceana* y *P. maximartinezii*, sin embargo no se muestran similitudes ecológicas entre ambas especies (Cuadro 2). Un porcentaje importante del espacio potencial de los taxones estudiados, se observa sobre praderas y pastizales, lo que demuestra su vulnerabilidad a fenómenos como lo es el cambio de uso de suelo.

CONCLUSIONES

A lo largo de la Sierra Madre Occidental existen condiciones climáticas y topográficas adecuadas para la supervivencia de especies piñoneras endémicas de México. Las variables climáticas mensuales y estacionales son útiles para predecir la distribución potencial de especies de *Pinus* de distribución restringida, específicamente las de mayor vulnerabilidad como *P. culminicola* y *P. maximartinezii*. La mayor oportunidad de conservación en función del tamaño del área potencial es para *Pinus johannis* y *P. pinceana*. La distribución de *Pinus jaliscana* y *P. nelsonii* está condicionada a precipitación, mientras que *P. maximartinezii* y *P. pinceana* a temperaturas máximas, caso contrario al de *P. culminicola* y *P. johannis* cuya distribución se asocia a variables derivadas de temperatura mínima. El tipo de suelo es determinante en la distribución potencial de las especies estudiadas.

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* 85: 875-882.
- Allouche, O., A. Tsoar and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43: 1223-1232. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x
- Araújo, B. M. and A. Guisan. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography* 33: 1677-1688. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x
- Ávila, C. R., R. Villavicencio y J. A. Ruiz. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el Occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(24): 92-109.
- Barbosa, A. M. 2015. fuzzySim: applying fuzzy logic to binary similarity indices in ecology. *Methods in Ecology and Evolution* 6: 853-858.
- Contreras, R., I. Luna y C. A. Ríos. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 421-433.
- Córdoba, R. D., J. Vargas y J. A. Arévalo. 2008. Adaptabilidad de poblaciones de *Pinus pinceana* en dos suelos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(3): 273-279.
- Cruz-Cárdenas. G., L. López.-Mata, J. T. Silva, N. Bernal-Santana, F. Estrada-Godoy and J. A. López-Sandoval. 2016. Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2): 135-148. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027
- Dvorak, W. S., J. A. Pérez de la Rosa, M. Mápula and V. J. Reyes. 1998. The ecology and conservation of *Pinus jaliscana*. *Forest Genetic Resources* 26: 13-19.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee and C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43-57. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa and B. T. Styles. 1997. A field guide to the pines of México and Central America. The Royal Botanic Gardens, Kew e Forest Institute, University of Oxford. Oxford, EUA. 151 p.
- Flores, R. L., A. Wegier, D. Ortega, A. Ortíz, D. Piñero, A. V. Whipple, F. Molina y C. A. Domínguez. 2013. Genetic, morphological, geographical and ecological approaches reveal phylogenetic relationships in complex groups, an example of recently diverged pinyon pine species (Subsection *cembroides*). *Molecular Phylogenetics and Evolution* 69(3): 940-949. DOI: 10.1016/j.ympev.2013.06.010

- García, A. A. y S. González. 1991. Flora y vegetación de la cima del cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana* 13: 53-74.
- García, E. 1998. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía-UNAM. 90 pp.
- GBIF. 2017. *Pinus culminicola*, *Pinus jaliscana*, *Pinus johannis*, *Pinus maximartinezii*, *Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana*. Global Biodiversity Information Facility. URL: <http://www.gbif.org/> (21 Febrero 2017).
- Gernandt, D. S. y J. A. Pérez de la Rosa. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Suplem. 85: S126-S133. DOI: 10.7550/rmb.32195
- González, E. M., M. S. González, L. Ruacho y M. Molina. 2011. *Pinus maximartinezii* Rzed. (Pinaceae), primer registro para Durango, segunda localidad para la especie. *Acta Botánica Mexicana* 96: 33-48.
- Guisan, A., and N. E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186
- Gutiérrez, E. y I. Trejo. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 179-188. DOI: 10.7550/rmb.37737
- Hernandez, P. A., I. Franke, S. K. Herzog, V. Pacheco, L. Paniagua, H. L. Quintana, A. Soto, J. J. Swenson, C. Tovar, T. H. Valqui, J. Vargas and B. E. Young. 2008. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and Conservation* 17: 1353-1366. DOI: 10.1007/s10531-007-9314-z
- Hijmans, R. J., S. Phillips, J. Leathwick and J. Elith. 2016. dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.1-1. <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>.
- INEGI. 2013. Modelo digital de elevación. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INIFAP-CONABIO. 2001. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Edafología. Escalas 1:250000 y 1:1000000. México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (consultado en junio de 2017).
- IPCC. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. DOI: 10.1111/j.1574-6968.2008.00186.x
- Jiménez, J., E. Jurado, O. Aguirre and E. Estrada. 2005. Effect of grazing on restoration of endemic dwarf pine (*Pinus culminicola* Andresen et Beaman) populations in northeastern Mexico. *Restoration Ecology* 13(1): 103-107. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2005.00012.x

- Leal-Nares, O., M. E. Mendoza, D. Pérez-Salicrup, D. Geneletti, E. López-Granados y E. Carranza. 2012. Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 83: 1152-1170. DOI: 10.7550/rmb.27199
- Martínez, J. G., C. Sánchez, R. Martínez, G. Sánchez, I. Trejo, A. Mora y E. Alanis. 2015. Primer registro de *Pinus pinceana* (Pinaceae) para Tamaulipas: aspectos ecológicos y estructurales. *Botanical Sciences* 93(2): 1-4. DOI: 10.17129/botsci.87
- Martínez-Méndez, N., E. Aguirre-Planter, L. E. Eguiarte y J. P. Jaramillo-Correa. 2016. Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences* 94(1): 2-24.
- Mateo, R. G., Á. M. Felicísimo y J. Muñoz. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 217-240.
- McDonald, J. A. 1990. The alpine-subalpine flora of northeastern Mexico. *SIDA, Contributions to Botany* 14(1): 21-28.
- Méndez, G. J., J. J. Návar y V. González. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 65: 38-55.
- Mirov, N. T., E. Zavarin and J. G. Bicho. 1962. Composition of gum turpentines of pines *Pinus nelsonii* and *Pinus occidentalis*. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 51(12): 1131-1355.
- Palma-Ordaz, S. y J. Delgadillo-Rodríguez. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences* 92(4): 587-597. DOI: 10.17129/botsci.135
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura and A. Townsend. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34: 102-117. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x
- Pérez, M. R., F. Moreno, A. González y V. Arreola. 2013. Escenarios de la distribución potencial de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. Y *Pinus pseudostrobus* Lindl. con modelos de cambio climático en el estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(15): 73-86.
- 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
- Ramos-Dorantes, D., J. L. Villaseñor, E. Ortiz and D. S. Gernandt. 2017. Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 215-223. DOI: 10.1016/j.rmb.2017.01.028.

- R CoreTeam. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>
- REMIB. 2017. *Pinus culminicola*, *Pinus jaliscana*, *Pinus johannis*, *Pinus maximartinezii*, *Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana*. La Red Mundial de Información sobre Biodiversidad, CONABIO. URL: http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/acerca_remib.html (18 Febrero 2017).
- Romero, 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
- Sáenz-Romero, R. C., G. E. Rehfeldt, J. M. Ortega-Rodríguez, M. C. Marín-Togo and X. Madrigal-Sánchez. 2015. *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. Botanical Sciences 93(4): 709-718. DOI: 10.17129/botsoci.86.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF). URL: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091yfecha=30/12/2010 (consultado abril de 2017).
- Téllez, V. O., Y. M. Chávez, A. Gómez y M. V. Gutiérrez. 2004. Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: estudio de cuatro especies de *Pinus*. Revista Ciencia Forestal en México 29(95): 61-82.
- Villarreal, J. A., O. Mares, E. Cornejo y M. A. Capó. 2009. Estudio florístico de los piñonares de *Pinus pinceana* Gordon. Acta Botánica Mexicana 89: 87-124. DOI: 10.21829/abm89.2009.308
- Villaseñor, J. L. y Téllez-Valdés, O. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica 75(2): 205-220.
- Zavarin, E. and K. Snajberk. 1987. Monoterpene differentiation in relation to the morphology of *Pinus culminicola*, *Pinus nelsonii*, *Pinus pinceana* and *Pinus maximartinezii*. Biochemical Systematics and Ecology 15(3): 307-312. DOI: 10.1016/0305-1978(87)90004-4
- Zonneveld, M., A. Jarvis, W. Dvorak, G. Lema and C. Leibing. 2009. Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. Forest Ecology and Management 257: 1566-1576. DOI:10.1016/j.foreco.2008.12.027