

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Modelado de la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez por efectos
del cambio climático

Por:

XOCHITL MORENO BETANCOURT

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Modelado de la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez por efectos
del cambio climático

Por:

XOCHITL MORENO BETANCOURT

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:

Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal

Dr. Alejandro Zárate Lupercio
Coasesor

Dr. Genaro E. García Mosqueda
Coasesor

Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de División de Agronomía



Saltillo Coahuila, México
Diciembre de 2020

DEDICATORIAS

A Dios por darme la vida y mucha salud

A mis padres

Estela Betancourt Benavides y Juan Manuel Moreno Muñoz

Por su gran apoyo durante el transcurso de mi carrera, que con mucho amor y cariño siempre estaban al tanto de mí, por sus oraciones que indudablemente sé que lo hicieron y siempre confiando en Dios quien me guardó en todo momento.

A mis hermanos

Juan Manuel, Ruth, Esthela, Ricardo, José Daniel, Tere, Salomón, Rocío, David, Brenda y

Rubén Moreno Betancourt

Por su apoyo incondicional y por ser esa gran familia unida para cualquier necesidad, la distancia nos podrá separar, pero aun así teníamos el mismo sentir.

Culminar esta etapa de mi vida es una gran satisfacción que siento

“Es un logro en conjunto”

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

A mi Alma Terra Mater, por las oportunidades que me brindó que son incomparables.

A todos los maestros del Departamento Forestal

A todos los Maestros por sus valiosos conocimientos que indudablemente han sido parte de mi formación, gracias por su infinita paciencia y dedicación, les estaré agradecida toda la vida.

Al Dr. Jorge Méndez González

De manera especial agradecerle por confiar en mí para realizar este trabajo, gracias por su tiempo, paciencia y dirección. Por sus conocimientos y aportaciones para mi formación. ¡En verdad gracias!

Al Dr. Alejandro Zárate Lupercio, Dr. Genaro Esteban García Mosqueda y al Dr. Andrés Flores García

A mis coasesores por el tiempo que destinaron para la revisión de este documento, así mismo por su contribución.

A Luis Enrique Hernández Hernández

Por su gran apoyo incondicional en cada situación, aun a pesar de la distancia ¡Gracias!

A mis compañeros de generación CXXX

Por ser parte de esa experiencia única de universitarios, que no la compararía con nada. A pesar de nuestras diferencias sabíamos trabajar en equipo, apoyándonos en todo. A María del Carmen Guzmán, Roberto Flores, Arley Eduardo Gómez, Sergio Octavio González, Heriberto del Billar, Héctor Alejandro García, Leonel Montesinos, y en general a todos todos... ¡Muchas gracias!

CONTENIDO

CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
I. INTRODUCCIÓN	12
Objetivo general	14
Objetivos específicos	15
Hipótesis.....	15
II. REVISIÓN DE LITERATURA	16
Cambio climático global	16
Distribución del género <i>Pinus</i>	17
Factores que limitan la distribución de una especie	17
Modelos de distribución de especies y nicho ecológico	18
Modelos de Circulación General.....	19
Diagrama BAM	19
MaxEnt (Máxima Entropía)	20
R programa estadístico	20
Algunos estudios sobre distribución de especies	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
Descripción del área de estudio.....	24
Variables bioclimáticas - Modelos de Circulación General.....	24
Registros de presencia de la especie y limpieza.....	26
Área de calibración	26
Elaboración del espacio ambiental.....	27
Selección de variables bioclimáticas para modelación actual y futura	27
Calibración, creación, evaluación y selección de modelos de idoneidad	28

Estratificación de modelos de idoneidad de la especie	29
Áreas potenciales idóneas para el futuro.....	30
Perfil bioclimático de la especie	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
Modelo de idoneidad de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez.....	32
Tolerancias climáticas de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez, en temperatura y precipitación .	33
Estratos de idoneidad climática de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez.....	34
Áreas idóneas-no idóneas de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez para el 2050.....	39
Incertidumbre de las predicciones y medidas de transferencia	45
Perfil bioclimático de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez.....	47
Respuesta de las variables a la idoneidad climática.....	51
V. CONCLUSIONES.....	53
VI. RECOMENDACIONES.....	54
VI. BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Espacio ambiental y nicho fundamental de *Pinus douglasiana* Martínez, construido con temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5), temperatura mínima del mes más frío (Bio 6) y precipitación anual (Bio 12). Círculos rojos corresponden a los registros de la especie, mientras que los círculos verdes son combinaciones ambientales de México extraídas de 50 000 píxeles de 5x5 km de resolución.34
- Figura 2.** Idoneidad climática actual (a) y al 2050 (b-g) predicha a través de máxima entropía, estratificada en alta, media y baja, en la modalidad extrapolación libre para *Pinus douglasiana* Martínez, usando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General: MIROC5 (b y c), HadGEM2-AO (d y e) y CCSM4 (f y g), en dos trayectorias representativas de concentración, RCP 4.5 (b, d y f) y 8.5 (c, e y g).36
- Figura 3.** Clasificación de áreas de idoneidad predichas a través de máxima entropía al 2050 para *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General (MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4), a un RCP de 4.5.40
- Figura 4.** Clasificación de áreas de idoneidad predichas a través de máxima entropía al 2050 para *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General (MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4), a un RCP de 8.5.42
- Figura 5.** Incertidumbre promedio (coeficiente de variación) de predicciones de idoneidad de *Pinus douglasiana* Martínez, obtenida a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general (MCG) en los RCP 4.5 (a) y 8.5 (b) al 2050. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promedio de tres MCG, en el RCP 4.5 (c) y 8.5 (d).46
- Figura 6.** Histograma de densidad de tres variables que más contribuyeron al modelo de idoneidad climática de *Pinus douglasiana* Martínez. Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido), Bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío) y Bio 12 (Precipitación anual).50

Figura 7. Respuesta de las variables bioclimáticas a la idoneidad climática predicha a través de máxima entropía para *Pinus douglasiana* Martínez, usando extrapolación libre. Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido), Bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío), Bio 12 (Precipitación anual) y Bio 15 (Estacionalidad de la precipitación). Los círculos negros representan los registros totales de la especie (entrenamiento y validación).52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables utilizadas para generar los mapas de distribución actual y futuro de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez.....	25
Tabla 2. Numero de modelos candidatos generados y estadísticos de ajuste y validación.	32
Tabla 3. Superficie y tasa de cambio de superficie de idoneidad actual con respecto a la estimada al año 2050, en <i>Pinus douglasiana</i> Martínez, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general.	37
Tabla 4. Superficie estimada en los diferentes estratos de idoneidad climática de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez, en su distribución actual.....	38
Tabla 5. Idoneidad climática (km ²) de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez al 2050 estimada a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en el área de calibración.	43
Tabla 6. Clasificación de áreas de idoneidad de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez, a nivel global al 2050, predichas a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos vías de concentración representativas, RCP's 4.5 y 8.5.	45
Tabla 7. Contribución relativa de las variables al modelo de idoneidad de <i>Pinus douglasiana</i> Martínez, acorde a la prueba de Jackknife y perfil bioclimático detallado actual y futuro.	48

RESUMEN

La distribución geográfica de una especie está fuertemente relacionada con las variables ambientales. Los modelos generales de circulación (GCM's) predicen incremento de temperatura por encima de los 2 °C y alta variación de precipitación a nivel global para el 2050, esto podría afectar la distribución geográfica de muchas especies. El objetivo de este estudio fue modelar la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando 321 registros de presencia de la especie y 15 variables bioclimáticas actuales y futuras (2050) de tres GCM's: CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5, en dos escenarios de emisiones de CO₂, o vías de concentración representativas, RCP's: 4.5 y 8.5. La calibración, creación, evaluación del modelo final y el riesgo de análisis de extrapolación se realizó en 'kuenm' un paquete de R que usa Maxent como algoritmo de modelación. De Un total de 294 modelos candidatos, se seleccionó solo uno por cumplir con los criterios establecidos. El modelo final fue de respuesta cuadrática (q), con un regularizador 2, donde Bio 11 y Bio 5 son las variables que más determinan la idoneidad climática de esta especie contribuyendo al modelo con 56.0 y 33.6 %. El algoritmo de Maxent no predice nuevas áreas idóneas para *P. douglasiana*, al contrario, se predice una reducción de las áreas de alta idoneidad (>0.54) al 2050 dentro del área de calibración, en promedio -63.74 %. Esta especie es sensible al cambio climático, el incremento de casi 2 °C en el area de distribución actual de la especie podría ser responsable de la disminución de las áreas idóneas de esta especie.

Palabras clave: Distribución potencial, Maxent, variables bioclimáticas, impacto del cambio climático.

ABSTRACT

The geographical distribution of a species is strongly related to environmental variables. The general circulation models (GCM's) predict an increase in temperature above 2 °C and a high variation in precipitation at a global level by 2050, this could affect the geographical distribution of many species. The objective of this study was to model the current and potential distribution of *Pinus douglasiana* Martínez, using 321 records of presence of the species and 15 current and future bioclimatic variables (2050) of three GCM's: CCSM4, HadGEM2-AO and MIROC5, in two CO₂ emission scenarios, or representative concentration pathways, RCP's: 4.5 and 8.5. Calibration, creation, evaluation of the final model and the risk of extrapolation analysis was carried out in 'kuenm' an R package that uses Maxent as modeling algorithm. A total of 294 candidate models were created, only one was selected for meeting the established criteria. The final model has a quadratic response (q), a value of 2 as regularizer, where Bio 11 and Bio 5 are the variables that most determine the climatic suitability of this species, contributing with 56.0 and 33.6% to the model. The Maxent algorithm does not predict new suitable areas for *P. douglasiana*, on the contrary, a reduction of the areas of high suitability (> 0.54) is predicted by 2050 within the calibration area, on average -63.74%. This species is sensitive to climate change, the increase of almost 2 °C in the current range of the species could be responsible for the decrease in suitable areas for this species.

I. INTRODUCCIÓN

México es considerado como un centro de diversidad del género *Pinus*, ya que cuenta con cerca de 42 % de las especies y el porcentaje de endemismo que presenta es alto (> 55 %); además se conoce que el país alberga el mayor número de especies de pino que cualquier otra región de tamaño similar en el mundo; los pinos son considerados como elementos dominantes de la vegetación ya que tienen un papel importante en la función del ecosistema (Sánchez, 2008). Este tipo de vegetación se distribuye entre 1,500 y 3,000 msnm, pudiendo sobrevivir hasta en 3,650 msnm en el norte y 4,000 msnm en el centro y sur de México (Yeaton, 1982).

Sánchez (2008) menciona dos centros de diversidad de *Pinus* en México: el primero es la franja volcánica transversal, con extensión a lo largo de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y el segundo en la Sierra Madre del Sur; dentro de estos centros de diversidad está presente el *Pinus douglasiana* Martínez. Esta especie se limita a las partes del Pacífico mexicano desde Sinaloa y Durango hasta Oaxaca (Farjon *et al.*, 1997). Crece entre los 1500 y 2500 m de altitud, con precipitación anual promedio de 1000 mm (Perry, 1991). La temperatura media es de 17 a 23 °C donde la mínima es de -2 °C y la máxima de 44 °C (CONAFOR, s.f). *P. douglasiana* Martínez es nativa de México y su gran importancia radica en que está dentro de las 10 especies más utilizadas en programas de reforestación con fines de producción o restauración en México (Bernaola *et al.*, 2015).

Por otra parte en los últimos años se han generado una gran variedad de modelos climáticos, también llamados modelos de circulación general (MCG); a menudo son utilizados para evaluar los posibles cambios climáticos que se producen por los gases de efecto invernadero;

son reconocidos porque tienen la capacidad de simular las características del clima actual a escala global de una manera efectiva, además, se consideran la mejor herramienta para poder pronosticar el cambio climático futuro en escalas globales y regionales (Zorita y Storch, 1991; Klohn y Faurés, 2006). Acorde a estos modelos, se predice un calentamiento a nivel global de entre 1.4 y 5.8 grados Celsius entre 1990 y 2100 (Díaz, 2012).

Desde hace mucho tiempo es muy conocido que una vez que los factores climáticos y físicos cambian, pueden afectar la distribución de las especies (Soberón y Peterson, 2005). Debido a ello, las especies de flora tendrán un reto de supervivencia por las presiones del ambiente, tales como los cambios constantes en los ciclos hidrológicos y adaptarse en periodos cortos de tiempo (Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez, 2000). Varios factores influyen fuertemente para que las plantas se puedan desarrollar, cada especie necesita ciertas condiciones para cumplir su ciclo fenológico, lo anterior ha sido explicado a través del diagrama de BAM, donde A son las condiciones abióticas, B el medio biótico y M presencia de la especie según su dispersión (Soberón *et al*, 2017). Si en algún momento la temperatura y precipitación de alguna especie salen de sus rangos, por consecuencia su ciclo de vida no se podrá cumplir (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Por otra parte, Hutchinson (1957) sostuvo que el nicho puede interpretarse como el objeto multidimensional que puede acaparar las condiciones ambientales que una especie necesita; además, expresa que dentro del nicho existen áreas con condiciones favorables para la especie, y áreas con condiciones menos favorables en la periferia. Un nicho se puede reconstruir con los datos de ocurrencia de la especie y los datos con dimensiones topográficas, climáticas, edáficas, entre otras (Soberón y Peterson, 2005). El espacio

ambiental es el que está definido por reunir las condiciones ambientales bióticas y abióticas para que un individuo pueda sobrevivir (Vázquez, 2005).

Los modelos de distribución de especies son herramientas que han sido utilizadas para investigar los efectos del cambio en el clima sobre la distribución de las especies. Pronosticar la idoneidad ambiental de alguna especie, requiere el uso de variables ambientales (fuertemente relacionadas con la presencia encontrada) y registros de presencia (o ausencia) de la especie; a eso se le conoce como la función de un método de modelado; algún modelo que esté basado en nichos es meramente el acercamiento del nicho ecológico de una especie en las áreas ambientales estudiadas (Phillips *et al.*, 2006; Ávila *et al.*, 2014). El uso de los modelos de distribución de especies está presentando una mayor expansión y desarrollo por las metodologías que se están implementando para su interpretación (Wilson *et al.*, 2005), de modo que, la existencia de numerosos artículos ha ido en aumento con la temática de modelización de la distribución de especies (Mateo *et al.*, 2011). Maxent es uno de los principales algoritmos de modelación con mayor precisión (Kumar y Stohlgren 2009). Se puede aplicar en: especies en peligro de extinción (Kumar y Stohlgren, 2009), valorando el impacto del cambio climático (Lawler *et al.*, 2009), detectar plagas forestales (Salinas *et al.*, 2010) y detectar de manera anticipada enfermedades forestales (Meentemeyer *et al.*, 2008).

Objetivo general

Evaluar los impactos del cambio climático sobre la distribución actual y potencial en *Pinus douglasiana* Martínez, usando proyecciones climáticas al 2050 de tres modelos de circulación general, bajo dos vías de concentración representativas RCP 4.5 y 8.5.

Objetivos específicos

Generar y seleccionar un modelo robusto para estimar la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez, usando climatologías actuales y proyecciones climáticas al 2050 de tres modelos de circulación MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4, bajo dos vías de concentración representativas RCP 4.5 y 8.5.

Transferir el modelo de idoneidad climática en espacio y tiempo, para identificar la existencia de nuevas áreas idóneas, áreas de bajo impacto y áreas de alto impacto de *Pinus douglasiana* Martínez, a fin de determinar los efectos del cambio climático sobre la distribución de esta especie.

Establecer detalladamente el perfil bioclimático de *Pinus douglasiana* Martínez.

Hipótesis

Ho: El cambio en el clima global pronosticado al 2050, no tiene efectos sobre la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez.

Ha: El cambio en el clima global pronosticado al 2050 tiene efectos sobre la distribución actual y potencial de *Pinus douglasiana* Martínez.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Cambio climático global

Miller (2007) manifiesta que el cambio climático conlleva modificaciones en el clima del mundo, como el aumento de temperaturas, modificación de precipitaciones y las rutas de las tormentas. Los factores que causan el cambio climático y la temperatura media de la tierra son los cambios en el nivel del mar, la emisión de aerosoles a la atmósfera, aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano, e hidratos de metano (Díaz, 2012). Miller (2007) menciona que otros factores son la contaminación del aire, la cantidad de energía solar que alcanza la tierra y los cambios en el hielo polar.

Las consecuencias que se prevén sobre los recursos forestales serán graves, ya que, tendrán una mayor evapotranspiración y además algunas áreas se verán afectadas por la disminución de precipitación, ciertas especies van a migrar a mayores latitudes (p. ej. *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. y Cham. (Sáenz-Romero *et al.*, 2015)); por otro lado, las plagas serán más resistentes porque el número de días con heladas disminuirá (Raynal-Villaseñor, 2011).

El calentamiento global ha incrementado principalmente por la tendencia hacia el aumento de dióxido de carbono (CO₂), por los efectos naturales, pero también por actividades antropogénicas, tales como la quema de combustibles fósiles, la tala de árboles, etc.; el principal indicador del calentamiento es el aumento de temperatura promedio (Guerrero *et al.*, 2017).

Distribución del género *Pinus*

En México el pino es la principal conífera de clima templado y frío (SEMARNAT, 2016). La vegetación forestal que tiene nuestro país es de 138 millones de ha, siendo un equivalente al 70% de la superficie total; una gran parte de esta área está cubierta por bosques y selvas en una cantidad de 64.9 millones de ha, de las cuales se estima que 23% tiene potencial productivo para su aprovechamiento comercial (Torres-Rojo, 2004). En México y América Central el género *Pinus* se presenta entre las latitudes 12 y 32°N; el trópico de cáncer atraviesa casi por la parte media de México, es por eso que existen áreas de pinos que se podrían considerar como tropicales, aunque esto es desde un punto de vista geográfico y no desde el punto de vista climático (Perry 1991). La mayoría de los bosques de pinos mexicanos muestran resistencia a los periodos secos, a las heladas, al pastoreo, a incendios forestales y entre otros disturbios; por otro lado, el suelo donde se pueden desarrollar son suelos rocosos, someros y muchas veces bajos en nutrientes (Sánchez, 2008). Los pinos se pueden distribuir entre 1,500 y 3,000 m de altitud, pudiendo alcanzar los 3,650 msnm en el norte y 4,000 msnm en el centro y sur de México (Yeaton, 1982). Las temperaturas esta entre 6 y 28 °C y la precipitación media anual de 350 a poco más de 1,000 mm (Sánchez, 2008).

Factores que limitan la distribución de una especie

El área de distribución de una especie está definida por distintos factores, mismos que se lleva a cabo con diferente intensidad y escala (Pearson y Dawson, 2003). Soberón y Townsend (2005) definen cuatro factores que determinan el desarrollo de una especie: el primero son las condicione abióticas, sin dejar fuera el entorno físico, la edafología, aspectos

climáticos, entre otros, el segundo son los factores bióticos donde un conjunto de interacciones positivas (polinización, mutualismo, etc.) o interacciones negativas (enfermedades, competidores, etc.), se pueden dar para que las poblaciones se mantengan, ya sea con limitaciones o mejorándola, el tercer factor son las áreas que son idóneas para la distribución de la especie y finalmente, el cuarto es la capacidad que tenga la especie para ir adaptándose a nuevas condiciones de acuerdo a la evolución de las poblaciones.

Modelos de distribución de especies y nicho ecológico

Un modelo es el que se proyecta a la realidad, mostrando algunas de sus propiedades de manera parcial; en tanto, los modelos de distribución de especies son representaciones cartográficas de la idoneidad, que están basados en datos reales donde una especie puede tener condiciones adecuadas para prosperar, facilitando el estudio de los organismos (Mateo *et al.*, 2011). Estas variables pueden cumplir tres condiciones, la primera es que exista una relación potencial con la distribución de la especie en estudio (Hirzel y Lay, 2008); la segunda es que expongan una variabilidad adecuada en la zona de estudio (Mateo *et al.*, 2011) y por último que sean independientes, o que no muestren una correlación excesiva entre sí (Graham, 2003).

Las variables pueden ser geológicas, topográficas, climáticas y de diferentes tipos, y se podría esperar que individualmente o en combinación de alguna de ellas se puedan llegar a determinar los diferentes factores ambientales que necesariamente nos van a condicionar la presencia de la especie (Guisan y Zimmermann, 2000). La importancia de los modelos de distribución radica en la toma de decisiones para el manejo y conservación, en tanto que se

realizan estudios más profundos y a largo plazo, mismos que pueden contribuir al desarrollo de la investigación de una zona determinada (Naoki *et al.*, 2006).

El modelado de nicho ecológico o de distribución de especies es una alternativa para estimar el impacto del cambio climático sobre el espacio geográfico de la especie (Peterson, 2006). Se conocen dos técnicas para realizar el modelado: las correlativas y las mecanicistas (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). Las correlativas toman en cuenta las variables ambientales relacionándolas con los datos de ocurrencia, mientras que las mecanicistas están basadas en experimentos fisiológicos de la especie en estudio (Anderson y Raza, 2010).

Modelos de Circulación General

La función principal de los Modelos de Circulación General (MCG) es simular a nivel global la atmósfera y los océanos, siendo que en la atmósfera comprenden los vientos, las nubes y la humedad, en tanto que estos modelos en los océanos toman en cuenta las corrientes marinas, la salinidad y la temperatura (Magaña *et al.*, 1997). Actualmente se encuentran disponibles múltiples MCG que han sido desarrollados por varios grupos de investigación y las diferentes simulaciones están fundamentadas en distintas condiciones experimentales iniciales y en diferentes algoritmos (Harrison *et al.*, 2016).

Diagrama BAM

Para que una especie se pueda distribuir en su área, más que el nicho fundamental, se necesitan muchos factores; para aclarar lo anterior, nos referiremos al diagrama de BAM donde se representa el espacio geográfico G para explicar diferentes regiones (Soberón *et al.*, 2017). Dicho diagrama explica que una determinada especie tiene altas posibilidades de

distribuirse en zonas donde se puedan cumplir lo siguiente: condiciones abióticas (A) necesarias, que el medio biótico de la especie sea favorable (B) y la presencia de la especie según sus capacidades de dispersión (M) (Soberón y Peterson, 2005). G_0 es donde ocurre el nicho realizado (N_R), mientras que el área G_I es la región con condiciones óptimas, y que por alguna razón la especie no ha logrado colonizar (Soberón *et al.*, 2017).

MaxEnt (Máxima Entropía)

Phillips *et al.* (2006) mencionan que Maxent está enfocado en la modelación de solo presencia para la distribución de especies, es decir, que está listo para ser usando en cualquier tipo de datos que solo incluyan presencias. No es necesario ingresar ausencias ya que son generadas por Maxent, llamadas *background* (Mateo *et al.*, 2011). Está enfocado en ajustar la distribución de especie a los pixeles del área estudiada, de esa manera la mejor explicación maximizará la entropía, que en la modelación de nichos ecológicos está basado en los valores de los pixeles de la especie estudiada (Phillips *et al.*, 2006).

R programa estadístico

Oficialmente fue presentado en 1997, este programa utiliza un lenguaje de programación de uso libre, de código abierto y gratuito, fue desarrollado por varios países como un proyecto de colaboración estadístico, fundado sobre comandos y facilita las opciones y procedimientos a través de sintaxis (Ihaka y Gentleman, 1996). Cada vez más universidades lo incluyen en sus planes de estudio ya que R crea la programación para el análisis estadístico y gráfico de datos, y se ha visto que conforme pasa el tiempo se ha vuelto más popular entre los investigadores de todas las áreas disciplinarias (Avello y Seisdedo, 2017).

Algunos estudios sobre distribución de especies

Se desarrolló un trabajo para la distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco, donde trabajaron con ocho variables climáticas interpoladas y nueve ambientales para modelar en Maxent 3.3.3; de acuerdo a la prueba de jackknife las variables que más contribuyen al modelo y por ende en la distribución de la especie son el suelo, la altitud, la precipitación media anual las temperaturas mínimas, media y máximas, con AUC arriba de 0.85 (Ávila *et al.*, 2014).

Garza-López *et al.* (2016) determinaron la distribución potencial del hábitat climático propicio para *Swietenia macrophylla* King para el 2030, usando Maxent y se obtuvieron las variables de mayor contribución para la predicción del modelo, las cuales fueron temperatura media del mes más frío (30.2 %), temperatura media mínima (20.8 %) y Precipitación de temporada de crecimiento (15.7 %), se encontró que habrá una pérdida de hábitat climático del 60% y la Reserva de la Biósfera de Calakmul puede ser refugio de dicha especie, sin embargo, en áreas como Quintana Roo prácticamente desaparece.

En el estado de Michoacán se evaluó la distribución potencial de 12 especies de pinos en condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático, para realizar dicha evaluación se usaron datos del clima actual, de escenarios futuros, de propiedades del suelo y el modelo digital de elevación, el modelado se realizó con Maxent; los resultados reflejan que habrá una disminución de un 16 y 40% de áreas idóneas en los horizontes cercano y lejano (2015-2039 y 2075-2099), respectivamente; las variables utilizadas junto con su contribución Bio 6 (92.3%), Bio 5 (4.9%), Bio 17 (0.1) y potasio (K) (2.7%); el AUC fue de 0.8 en la mayoría de las especies (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016).

Otro estudio que se realizó para determinar el impacto potencial del cambio climático en *Pinus hartwegii* Lindl. donde se usaron tres modelos de circulación general, MIROC-ESM-CHEM, CCSM4 y HadGEM2-ES, y dos vías de concentración representativa (RCP) 2.6 y 8.5 para horizontes de dos tiempos 2050 y 2070; de acuerdo a los resultados se prevé una reducción de hasta 70% para el 2070. Las variables que más contribuyeron al modelo fueron Bio 10 (54.4 %), Bio 1 (10 %), Bio 7 (8.4 %) y Altitud (8.4%); cabe mencionar que se usaron cuatro algoritmos (GBM, RF, SVM y Maxent) el que generó el modelo con el ajuste más alto fue Maxent con un AUC ratio de 1.787 lo que indica que para *P. hartwegii* es el algoritmo que predice mejor el área de idoneidad ambiental (Alfaro-Ramírez et al., 2020).

Al noreste de México se realizó un estudio con pinos piñoneros *Pinus cembroides* Zucc., *Pinus culminicola* Andresen y Beaman. y *Pinus nelsonii* Shaw., los escenarios de distribución potencial para las tres especies fueron: a) con el set de 19 variables bioclimáticas y b) con 19 variables bioclimáticas y tres variables topográficas; la modelación fue a través de Maxent donde las variables con más contribución en *P. culminicola* fueron altitud (44.4%), Bio11 (24.4%) y pendiente (18.3%); en *P. cembroides* Bio 9 (26.6%), Bio 5 (11.6%) y pendiente (10.1%) y para *P. nelsonii* Bio 6 (23.7%), altitud (21.2%) y Bio 11 (12.9%); el AUC está por encima de 0.97 (García-Aranda et al., 2018).

Otro estudio que se realizó para conocer la distribución de 56 especies del género *Pinus* en México, la modelación fue por medio de Maxent, el objetivo fue investigar cuales eran las especies de pino clasificadas por la UICN como amenazadas y que tuvieran una representación adecuada en las áreas protegidas de México; se encontró que casi el 70% de

las especies tienen menos del 10% de su distribución modelada protegida. El AUC de la mayoría de las especies está encima de 0.8 (Aguirre y Duivenvoorden, 2010).

En Asia sudoriental se realizó un estudio para estimar la presencia potencial de *Pinus kesiya* Royle ex Gordon. y *Pinus merkusii* Jungh y de Vriese. en las condiciones climáticas actuales y reconocer cuáles serán las modificaciones en la frecuencia de los individuos que resulten del cambio climático, se realizaron proyecciones climáticas para el 2050 usando los modelos HADCM3 y CCCMA por medio de Maxent y utilizando 19 variables bioclimáticas derivadas de las capas climáticas mundiales de la base de datos WORLDCLIM (Zonneveld *et al.*, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La distribución de *Pinus douglasiana* está mayormente en las montañas del eje neo volcánico de México, aunque su propagación puede alcanzar más al norte a través de la Sierra Madre Occidental (SMO) y hacia el sur por la Sierra Madre del Sur (SMS); la presencia de la especie se ha reportado específicamente en los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán, México, Guerrero y Oaxaca (Perry, 1991). La altitud donde puede proliferar es de 1500 y 2500 m, precipitación media anual de 1000 mm, además en las elevaciones más altas suceden heladas algo comunes durante el invierno (Perry, 1991). La temperatura media es de 17 a 23 °C donde la mínima es de -2 °C y la máxima de 44 °C (CONAFOR, s.f).

Variables bioclimáticas - Modelos de Circulación General

En este estudio se usaron las llamadas variables bioclimáticas (Bios) en formato digital (Ávila *et al.*, 2014), con una resolución de 0.041666665 grados angulares y re muestreadas a 5 km². Se trabajó con 15 variables climáticas (Tabla 1) de CHELSEA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) del periodo 1979-2013 para predecir la distribución actual, y las mismas variables del periodo 2040-2060, promedio 2050, para predecir la distribución futura de la especie (Karger *et al.*, 2017). Se descartaron Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 ya que combinan información de temperatura y precipitación, dando resultados desacertados (Escobar *et al.*, 2014). Se usaron tres modelos de circulación general (MCG) CCSM4 (Gent *et al.*, 2011), HadGEM2-AO (Martin *et al.*, 2011) y MIROC5

(Watanabe *et al.*, 2010), mismos en los que se usaron las vías de concentración de bióxido de carbono (RCP) 4.5 y 8.5.

Tabla 1. Variables utilizadas para generar los mapas de distribución actual y futuro de *Pinus douglasiana* Martínez.

Variable	Descripción
Bio 1	Temperatura media anual (°C)
Bio 2	Intervalo medio diurno (Media por mes [Temp. Máx - Temp. Min.])
Bio 3	Isotermalidad (Bio 2 / Bio 7)*(100)
Bio 4	Temporalidad de la temperatura (desviación)
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio 7	Intervalo de temperatura anual (Bio 5 - Bio 6)
Bio 10	Temperatura media del 1/4 anual más cálido (°C)
Bio 11	Temperatura media del 1/4 anual más frío (°C)
Bio 12	Precipitación anual (mm)
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Bio 14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio 15	Temporalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)
Bio 16	Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm)
Bio 17	Precipitación de 1/4 anual más seco (mm)

Registros de presencia de la especie y limpieza

Los registros de presencia de *P. douglasiana* se obtuvieron de la Red Mundial de Información sobre la Biodiversidad (REMIB), Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), Portal de datos abiertos UNAM y Artículos científicos, teniendo un total de 466 registros. Se realizó la limpieza de los registros (Cobos *et al.*, 2019), excluyendo datos erróneos (García-Aranda *et al.*, 2018) como: datos geográficos duplicados, fuera del área de distribución y aquellos que se encontraban en áreas atípicas (infraestructura y parcelas). Así mismo se realizó un análisis de componentes principales, utilizando las variables bioclimáticas (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015) generando una elipse al 99 %, aquellos registros fuera de esta elipse fueron verificados en el espacio geográfico, y en del rango de distribución de la especie, si estaban fuera de ellos se eliminaron. Además, se eliminaron registros por altitud, y también aquellos fuera del percentil 5-95 %. Por último, se usó el paquete Sp-Thin en R para eliminar la autocorrelación entre los registros que resultaron de la primera limpia, donde la distancia fue de 5 km entre punto y punto (Aiello-Lammens *et al.*, 2015).

Área de calibración

Según Soberón y Peterson (2005) el área M es donde la especie puede desarrollarse debido a sus capacidades de dispersión. El área M se delimitó de acuerdo a las ocurrencias conocidas, una vez finalizada la limpieza de los datos, estos se cargaron al programa ArcMap 10.5, donde se generó un buffer de 100 km a la redonda de cada registro, mismo en el que se utilizó la herramienta de smooth para suavizarlo y tener mejor calidad cartográfica.

Elaboración del espacio ambiental

Cuando se reúnen las condiciones ambientales bióticas y abióticas para que un individuo pueda sobrevivir, a eso se le conoce como espacio ambiental (Vázquez, 2005). Una vez limpios los registros, se generó el espacio ambiental en R, utilizando las variables bioclimáticas Bio 5, Bio 6 y Bio 12, para conocer las tolerancias climáticas y el nicho fundamental de *P. douglasiana* sobre estas variables.

Selección de variables bioclimáticas para modelación actual y futura

La selección de variables bioclimáticas es fundamental para modelar la distribución de una especie, si la selección no es adecuada, las predicciones serán sesgadas. Primero se realizó la correlación en ArcMap 10.5 donde se ingresaron las capas raster en formato (ASCII) del área de calibración para ubicar las variables que estuvieran o no correlacionadas entre sí, solo aquellas con correlación menor al 0.8 fueron seleccionadas. En MaxEnt 3.4.1 y utilizando los parámetros por default, 70% de los registros para modelación y el resto para validación, se realizó una primera modelación a escenario actual y futuro para ver el comportamiento de las variables sobre la predicción, y a partir de ahí comenzar a excluir las que predecían erróneamente. Adicionalmente se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para identificar y seleccionar las variables que más contribuyeron al modelo y de estas elegir las considerando que no estuvieran correlacionadas entre sí. Del conjunto de variables seleccionadas después de cumplir los criterios establecidos, se definieron tres grupos de variables. Es importante que, al momento de realizar la selección de variables, solamente se elija una de las más correlacionadas, con un valor de $r \leq 0.8$ (Martínez-Méndez *et al.*, 2016).

Aunado a esto, la selección de variables consideró la distribución de la variable, esto consistió en realizar histogramas con los registros de la especie, seleccionando aquellas que mostraron una distribución normal o sesgada (izquierda o derecha), ya que se ha demostrado que estas contribuyen significativamente al perfil de la especie.

Calibración, creación, evaluación y selección de modelos de idoneidad

La modelación se realizó en *Kuenm*, un paquete de R (Cobos *et al.*, 2019) que usa Maxent (máxima entropía) como algoritmo de modelación donde se llevan a cabo procesos de calibración, creación y evaluación (Phillips *et al.*, 2006). Primero fue necesario dividir los datos de ocurrencia en subconjuntos: calibración y evaluación, que son exclusivos del conjunto completo de registros; para calibrar (entrenar) los modelos de aproximadamente el 90% de los datos, en tanto que para evaluar (probar) las predicciones del modelo se usaron el 10% restante (Thuiller, 2003), este porcentaje dependió de la fuente y disponibilidad de datos ya que los registros para validación deben ser independientes a los de entrenamiento. En la modelación de Maxent se usan características (respuesta) de seis clases: lineales= l, cuadráticas= q, producto= p, umbral= t, bisagra= h e indicadores de categoría= c (Phillips y Dudik, 2008). Con esto, se evaluaron 14 multiplicadores de regularización (0.1 - 0.9 y del 1 al 5), 7 tipos de respuesta (l, q, p, lp, lq, lqp y qp) y tres grupos de variables ambientales (set 1 [Bio 5, 7, 11, 12 y 15], set 2 [Bio 4, 6, 10,16 y 15] y set 3 [Bio 1, 5, 7, 13 y 15]).

La modelación final de esta especie se creó a través de tres tipos de extrapolación: extrapolación libre, extrapolación clamping y sin extrapolación. En la extrapolación libre, la respuesta de las áreas ambientalmente diferentes del área de calibración, presentan una

tendencia similar a los datos ambientales de calibración; la extrapolación clamping, está determinado por los niveles que se presentan en la periferia del área de calibración del espacio ambiental; y finalmente la no extrapolación, es donde la respuesta se vuelve cero en caso de que las áreas de transferencia sean más extremas en comparación con las del área de calibración (Cobos *et al.*, 2019).

Para elegir el mejor modelo se consideró: a) 1) estadístico ROC parcial (Curva Operada por el Receptor) (Peterson *et al.*, 2008), 2) tasa de omisión ($E = 5\%$), 3) valor más bajo del Criterio de Información de Aikaike (AICc), 4) curvas de respuesta de la especie a los gradientes ambientales y 5) significancia estadística del modelo, p -values. Aquí se usó el ROC parcial en lugar del area bajo la curva ROC (AUC) debido a que este último no es una buena medida de ajuste en ENM (Lobo *et al.*, 2007). Finalmente, se tomaron en cuenta las pruebas de Jackknife para revisar la respuesta independiente de cada variable en la generación del modelo (García-Aranda *et al.*, 2018). Del modelo final (seleccionado bajo estos criterios establecidos) se hicieron 10 repeticiones para minimizar el sesgo en las predicciones, siendo este promedio el utilizado para los diferentes análisis.

Estratificación de modelos de idoneidad de la especie

El modelo continuo de idoneidad seleccionado de la especie fue estatificado en alta, media y baja. Es común utilizar un umbral de idoneidad sin considerar un criterio estadístico, como la varianza continua, o la forma de la distribución, lo que si fue considerado en este estudio. Para esto, se distribuyeron 10,000 puntos aleatorios en el área de calibración (M) y se extrajeron los valores de idoneidad del modelo seleccionado; posteriormente en R utilizando

el paquete StratifyR (Reddy y Khan, 2020) se definieron los estratos bajo, medio y alto. La estratificación es un método que determina los límites de los estratos y tamaño de muestra óptimo de las variables en evaluación, y haciendo uso de la distribución de frecuencia del mejor ajuste de la variable de interés (si existen datos disponibles) o distribución hipotética (si no hay datos disponibles) (Reddy *et al.*, 2018).

Áreas potenciales idóneas para el futuro

Similarmente, el mapa (modelo) continuo de idoneidad del modelo seleccionado de *P. douglasiana* fue reclasificado en cero y uno (0 y 1), el valor de cero (0) fue desde la idoneidad mínima, hasta el límite inferior del segundo estrato obtenido en la sección anterior, mientras que el valor de uno (1), correspondió al resto de la idoneidad. Con el resultado de esta reclasificación, se realizó algebra de raster, de tal manera que se pudieran definir las siguientes áreas: nuevas áreas idóneas, NAI (aquellas que no existían en la actualidad pero que en el 2050 se presentarán), áreas de alto impacto, AAI (idóneas actualmente pero no en el 2050) y áreas de bajo impacto, ABI (idóneas tanto en la actualidad como en el 2050), de cada una de estos tipos de áreas se calcularon las superficies correspondientes.

Así mismo, con las 10 repeticiones se calculó el coeficiente de variación para cada escenario RCP 4.5 y 8.5, para mostrar la incertidumbre de las predicciones. Al hacer la transferencia de un modelo en tiempo (tiempo) o espacio (nuevas áreas) es importante hacer su validación. En este estudio se utilizó la métrica MOP (paridad orientada a la movilidad), para identificar áreas en las que el modelo se transfiere implicaría necesariamente una extrapolación bajo condiciones climáticas futuras; el MOP reconoce aquellas áreas de extrapolación estricta y

además calcula qué tan similar se encuentra el ambiente entre las regiones de calibración y proyección (Owens *et al.*, 2013); cuando se dice que no hay áreas con extrapolación estricta se refiere a que no existen valores climáticos fuera del rango de la región de calibración (Alfaro-Ramírez *et al.*, 2020). Los mapas del MOP se realizaron para cada escenario RCP 4.5 y 8.5, promediando cada uno para finalmente tener dos mapas correspondientes.

Perfil bioclimático de la especie

Del set de variables que resultó elegido por *kuenm* (Cobos *et al.*, 2019), que mejor predice la idoneidad climática de la especie, y utilizando el total de los registros limpios, se extrajeron los valores de idoneidad para elaborar el perfil bioclimático, lo anterior se realizó dentro de R, utilizando el paquete *desc* (Csárdi *et al.*, 2018). En este mismo tenor, para tener evidencias del cambio esperado en el clima al 2050, acorde a los diferentes modelos de circulación general, se realizaron histogramas de densidad en R, con el paquete *ggplot2* (Wickham, 2011), para lo anterior, solo se consideraron las tres variables que más contribuyeron al modelo: Finalmente se elaboraron gráficos de la respuesta de las variables bioclimáticas seleccionadas por *kuenm*, a la idoneidad climática de la especie.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de idoneidad de *Pinus douglasiana* Martínez

Inicialmente se colectaron un total de 466 registros de *P. douglasiana* y una vez realizada la limpieza de los datos quedaron solamente 321, de los cuales 284 fueron para entrenamiento del modelo y 37 para evaluación (88.47 y 11.53 % respectivamente). Se generaron un total de 294 modelos candidatos, el modelo seleccionado fue de respuesta cuadrática (q), con un regularizador 2 y el set de variables Bio 5 [Temperatura máxima del mes más cálido °C], Bio 7 [Rango de temperatura anual °C], Bio 11 [Temperatura media del trimestre más frío °C], Bio 12 [Precipitación anual (mm)] y Bio 15 [Estacionalidad de la precipitación (mm)]. El tipo de respuesta que mejores predicciones mostró fue extrapolación libre. Todos los modelos resultaron estadísticamente significativos, pero ninguno de ellos, cumplió con el criterio de la tasa de omisión establecida (Tabla 2), por lo que se optó por incrementar la tasa de omisión, para seleccionar otro modelo.

Tabla 2. Numero de modelos candidatos generados y estadísticos de ajuste y validación.

Criterio/especie	<i>P. douglasiana</i>
	Generación de modelos
TmC	294
mES ($p \leq 0.05$)	294
mTO	0
mAIC	1
n de mES y mTO	0
n de mES y mAIC	1
n de mES, mTO y mAIC	0

Modelo seleccionado	M_2_F_q (Set1)
	Estadísticos de ajuste
Media AUC ratio	1.22
ROC Parcial	0
Tasa de omisión > 0.05%	0.7
AICc	5630.48
delta AICc	0
Núm. parámetros	4

Donde: TmC = Total de modelos candidatos; mES = Modelos estadísticamente significantes; mTO = Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión, mAIC = Modelos que cumplen con el criterio AICc; AICc = criterio de Información Aikaike.

Tolerancias climáticas de *Pinus douglasiana* Martínez, en temperatura y precipitación

De acuerdo al espacio ambiental de *P. douglasiana* se registran las siguientes tolerancias climáticas: temperaturas según Bio 5 (máxima del mes más cálido) de 19 hasta 33 °C y Bio 6 (mínima del mes más frío) de -2 hasta 15 °C y donde ocurre una precipitación anual de 602 hasta 1845 mm según Bio 12. Los círculos rojos corresponden a los registros de presencia de la especie (idoneidad climática) y los verdes (no idoneidad) indican valores de clima obtenidos aleatoriamente en México. El nicho fundamental representado por el elipsoide (**Figura 1**), evidencia la preferencia de *P. douglasiana* por valores bajos, tanto de precipitación como de las mínimas de las temperaturas extremas cálidas.

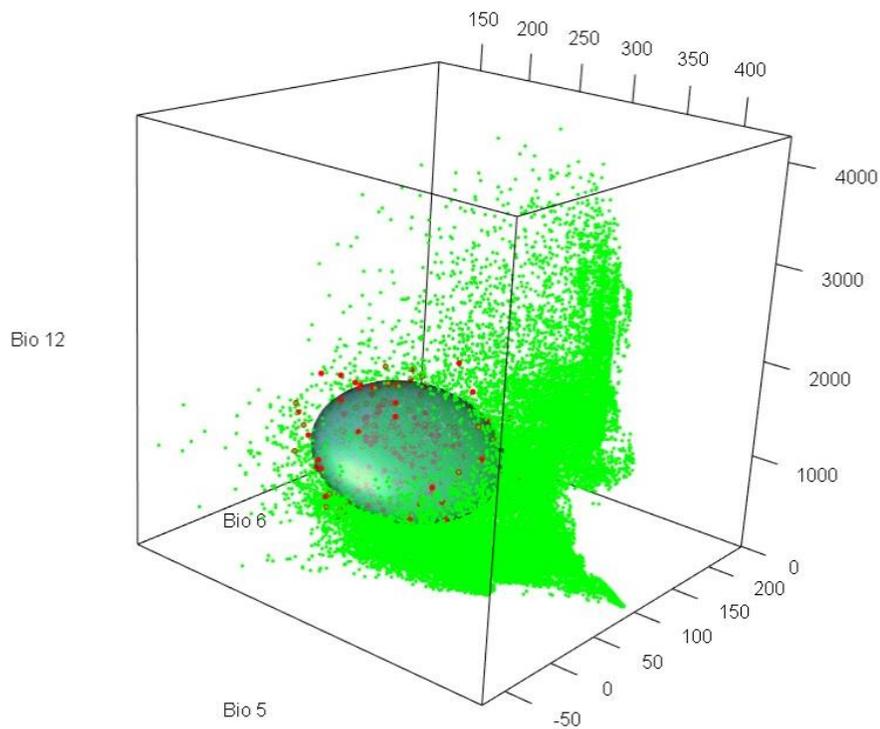


Figura 1. Espacio ambiental y nicho fundamental de *Pinus douglasiana* Martínez, construido con temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5), temperatura mínima del mes mas frio (Bio 6) y precipitación anual (Bio 12). Círculos rojos corresponden a los registros de la especie, mientras que los círculos verdes son combinaciones ambientales de México extraídas de 50 000 pixeles de 5x5 km de resolución.

Estratos de idoneidad climática de *Pinus douglasiana* Martínez

La idoneidad climática de esta especie mostró una distribución triangular con parámetros $a=0.014$, $b=0.999$ y $c=0.024$. Siguiendo una varianza constante, acorde a esta distribución, los rangos de idoneidad para *P. douglasiana* se muestran de la siguiente manera: baja de 0-0.26, media de 0.26-0.54 y alta de 0.54-0.99 (Figura 2). La superficie estimada en cada estrato en

el área de la distribución actual de la especie es de 216,074.91 km², 173,602.44 km² y 192,620.40 km² respectivamente; la idoneidad alta representa 33.08% del área de calibración, pero la idoneidad baja esta mayormente representada (37.11 %). La idoneidad más alta de esta especie se encuentra en Durango (42,253.85 km²) y Chihuahua (37,389.89 km²), ambas representan más del 20 % del área actual de la especie (Figura 2a y Tabla 4).

Estratificando la idoneidad climática de *P. douglasiana* al futuro (Figura 2b-g), usando los mismos umbrales que en el modelo actual (Figura 2a), se observa que los tres MCG predicen de forma diferente. Los resultados muestran que utilizando las proyecciones climáticas de los tres MCG, el algoritmo de máxima entropía, predice reducción de las áreas de alta idoneidad (>0.54) al 2050 dentro del área de calibración, en promedio 63.74 %, variando desde 37.73 % (RCP 4.5) hasta 88.92 % (RCP 8.5) con el modelo CCSM4. La idoneidad media (0.26-0.54) muestra tanto incremento (RCP 4.5) como decremento (RCP 8.5), por consiguiente, las áreas de baja idoneidad (<0.26), se incrementan significativamente (73.24 %) en un escenario drástico de emisiones de CO₂, (RCP 8.5) y solo 44.61 % en promedio con RCP 4.5 (Tabla 3).

Aunque el estudio de Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) se realizó a escala regional y es otro tipo de metodologías para generar el modelo de idoneidad de *P. douglasiana*, encontraron que la tasa de cambio de esta especie respecto a la línea base (1960-2000) en el horizonte más cercano es de -24.33% y para el horizonte lejano es de -57.11%, en todos los casos una disminución de las áreas idóneas de la distribución de la especie.

Predecir geográficamente donde ocurre la idoneidad climática y en sus diferentes niveles, es de suma importancia, ya que a partir de ahí es posible establecer programas de manejo, e

incluso de reforestación tal y como lo mencionan (Bernaola *et al.*, 2015), entre otros proyectos; la idoneidad baja es poco considerada, sin embargo, por lo encontrado aquí es posible que esta haya sido alta idoneidad en la historia de las especies, por lo que deber ser tomada muy en serio; es decir, puede ser el resultado de pérdida de alta idoneidad por efectos del cambio en el clima, incluso debido a factores antropogénicos.

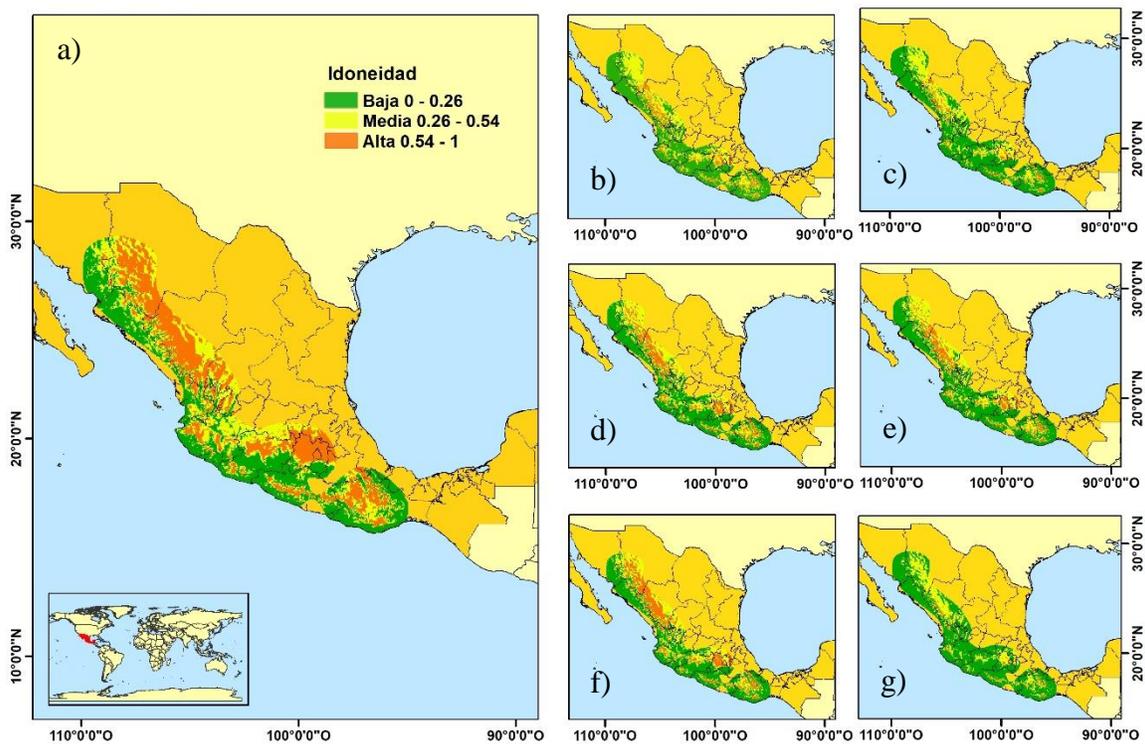


Figura 2. Idoneidad climática actual (a) y al 2050 (b-g) predicha a través de máxima entropía, estratificada en alta, media y baja, en la modalidad extrapolación libre para *Pinus douglasiana* Martínez, usando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General: MIROC5 (b y c), HadGEM2-AO (d y e) y CCSM4 (f y g), en dos trayectorias representativas de concentración, RCP 4.5 (b, d y f) y 8.5 (c, e y g).

La distribución actual predicha a través de máxima entropía para *P. douglasiana* (Figura 2) es concordante con lo que indica Perry (1991), al demostrar que la especie se distribuye desde Sonora, Chihuahua, Durango, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Michoacán, México, Guerrero y Oaxaca.

Tabla 3. Superficie y tasa de cambio de superficie de idoneidad actual con respecto a la estimada al año 2050, en *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general.

	Baja (<0.26)	Media (0.26-0.54)	Alta (>0.54)	Total
Idoneidad actual (km ²)	216074.93	173602.44	192620.40	582297.77
MIROC5 RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	345337.15	179616.85	57375.88	582329.88
Tasa de cambio (%)	59.82	3.46	-70.21	
MIROC5 RCP 8.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	377211.07	164485.35	40647.10	582343.53
Tasa de cambio (%)	74.57	-5.25	-78.90	
HadGEM2-AO RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	304003.59	180529.91	97830.96	582364.46
Tasa de cambio (%)	40.69	3.99	-49.21	
HadGEM2-AO RCP 8.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	322909.44	177499.97	81895.03	582304.44
Tasa de cambio (%)	49.44	2.25	-57.48	
CCSM4 RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	288056.24	174371.45	119939.32	582367.01
Tasa de cambio (%)	33.31	0.44	-37.73	
CCSM4 RCP 8.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	422844.96	138245.81	21340.18	582430.95
Tasa de cambio (%)	95.69	-20.37	-88.92	

Tabla 4. Superficie estimada en los diferentes estratos de idoneidad climática de *Pinus douglasiana* Martínez, en su distribución actual.

Estado	Superficie por estratos de idoneidad climática (km ²)				Porcentaje de la idoneidad climática			
	Baja	Media	Alta	Sup. km2	Baja	Media	Alta	Total %
Aguascalientes	3.29	79.1	96.84	179.23	0	0.01	0.02	0.03
Cd. México	0	0	1507.43	1507.43	0	0	0.26	0.26
Chihuahua	4196.65	23297.53	37389.89	64884.06	0.72	4	6.42	11.14
Colima	4905.13	516.61	237.17	5658.91	0.84	0.09	0.04	0.97
Durango	3708.2	19676.27	42253.85	65638.32	0.64	3.38	7.26	11.27
Guanajuato	0	8456.7	1149.64	9606.34	0	1.45	0.2	1.65
Guerrero	36084.93	8605.81	8146.87	52837.6	6.2	1.48	1.4	9.07
Hidalgo	0	1712.84	5716.27	7429.11	0	0.29	0.98	1.28
Jalisco	24001.47	28689.74	12320.75	65011.96	4.12	4.93	2.12	11.16
México	3125.02	2072.41	17326.24	22523.67	0.54	0.36	2.98	3.87
Michoacán	28406.01	16021.91	14677.18	59105.09	4.88	2.75	2.52	10.15
Morelos	3860.61	511.82	580.53	4952.96	0.66	0.09	0.1	0.85
Nayarit	11822.82	7152.84	5158.16	24133.83	2.03	1.23	0.89	4.14
Oaxaca	39317.96	21420.06	23894.4	84632.43	6.75	3.68	4.1	14.53
Puebla	4284.05	2839.39	4247.33	11370.78	0.74	0.49	0.73	1.95
Querétaro	0	2473.12	1720.82	4193.94	0	0.42	0.3	0.72
Sinaloa	27102.9	10151.38	2852.17	40106.45	4.65	1.74	0.49	6.89
Sonora	20012.55	8368.41	961.83	29342.78	3.44	1.44	0.17	5.04
Tlaxcala	0	0	1070.84	1070.84	0	0	0.18	0.18
Veracruz	3485.12	147.01	635.62	4267.76	0.6	0.03	0.11	0.73
Zacatecas	1758.22	11409.49	10676.57	23844.28	0.3	1.96	1.83	4.09
Total	216074.91	173602.44	192620.4	582297.76	37.11	29.81	33.08	100

Áreas idóneas-no idóneas de *Pinus douglasiana* Martínez para el 2050

Interesantemente, al modelar la distribución potencial de *P. douglasiana* al 2050, se observa que, en México, independientemente del escenario de emisiones de CO₂ (RCP) no existen nuevas áreas idóneas para esta especie (Figura 3a y Figura 4a), esto da la pauta para que de manera inmediata, se generen estrategias de conservación de las áreas idóneas actuales. No obstante, en el país, al 2050, en ambos escenarios y los tres MCG's, predicen grandes extensiones con áreas de bajo impacto, es decir; son áreas donde no está presente la especie, pero al 2050, reuniría las condiciones climáticas idóneas (Figura 3a; Figura 4a y Tabla 5). A nivel mundial, si se predicen nuevas áreas idóneas para esta especie (Figura 3b, c y d; Figura 4b, c y d), pero es notable que los tres modelos presentan diferencias importantes al predecirlas (NAI); en particular utilizando las proyecciones climáticas obtenidas con el modelo HadGEM2-AO (Tabla 6). Las predicciones de AAI y ABI, son similares al utilizar las proyecciones climáticas de los tres modelos de circulación general.

Los resultados también demuestran que la idoneidad climática actual de *P. douglasiana* en el área de calibración, muestra una relación positiva con la altitud, es posible que esto se deba a que a mayores altitudes existe mayor precipitación, y a la disminución de precipitación observada en las áreas bajas. La idoneidad climática más alta ocurre alrededor de 2000 msnm, tal dato coincide con lo que reporta (Martínez-Meyer *et al.*, 2013).

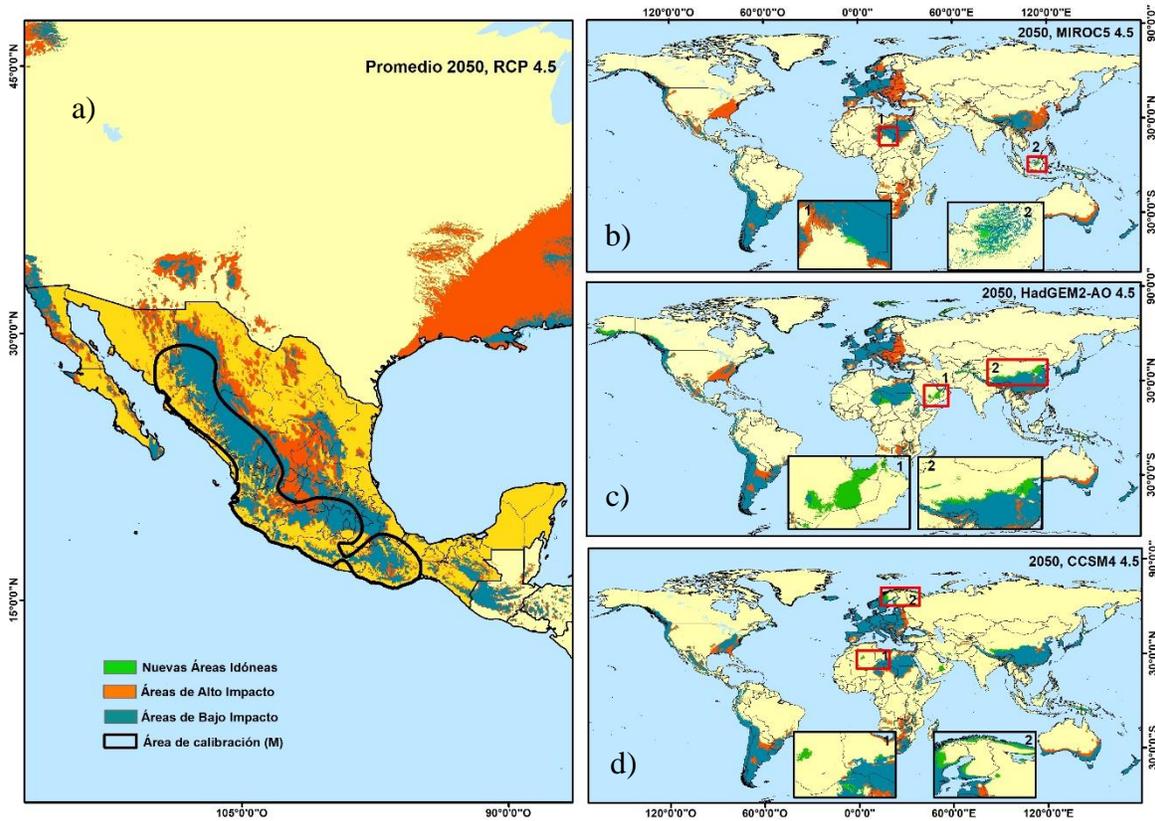


Figura 3. Clasificación de áreas de idoneidad predichas a través de máxima entropía al 2050 para *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General (MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4), a un RCP de 4.5.

En un estudio realizado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016), los resultados que encontraron indican que a nivel regional se pronostica una disminución de superficie de idoneidad climática en la mayoría de las especies estudiadas. La modelación de la distribución actual y potencial en especies de pino han sido varias: *P. teocote* Schltld. et Cham. (Aceves-Rangel *et al.*, 2018), *P. rudis* Endl. (Rios-Altamirano *et al.*, 2016), *P. leiophylla* Schltld. et Cham. (Sánchez-Romero *et al.*, 2015), *P. devoniana* Lindl. (Sánchez, 2008), por citar algunos ejemplos, destacando que todos estos estudios varían significativamente en la metodología

empleada. En *P. douglasiana* se reportaron cambios mínimos en su distribución (1 %); al parecer por ser especie tolerante, concluyendo que es una especie que presenta bajo impacto por el cambio climático (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016). Es importante resaltar que comparar los resultados en esta misma especie con la de otros autores resulta improcedente debido a tan distinta metodología, indudablemente se pone de manifiesto estandarizar los métodos de modelación.

En el presente estudio se tomaron en cuenta 321 registros a nivel nacional en todo el rango de distribución de la especie; mientras que el estudio realizado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) usaron solo 11 registros y en un área limitada de la distribución real de la especie, los criterios de selección de registros, de las variables bioclimáticas y de la configuración del algoritmo de modelación son un tanto diferentes. Algunos autores como Wisz *et al.* (2008) mencionan que se puede tomar un número mínimo de registros de 30 para tener modelos estadísticamente valiosos. Entonces entre mayor número de registros los resultados de la modelación serán mejor.

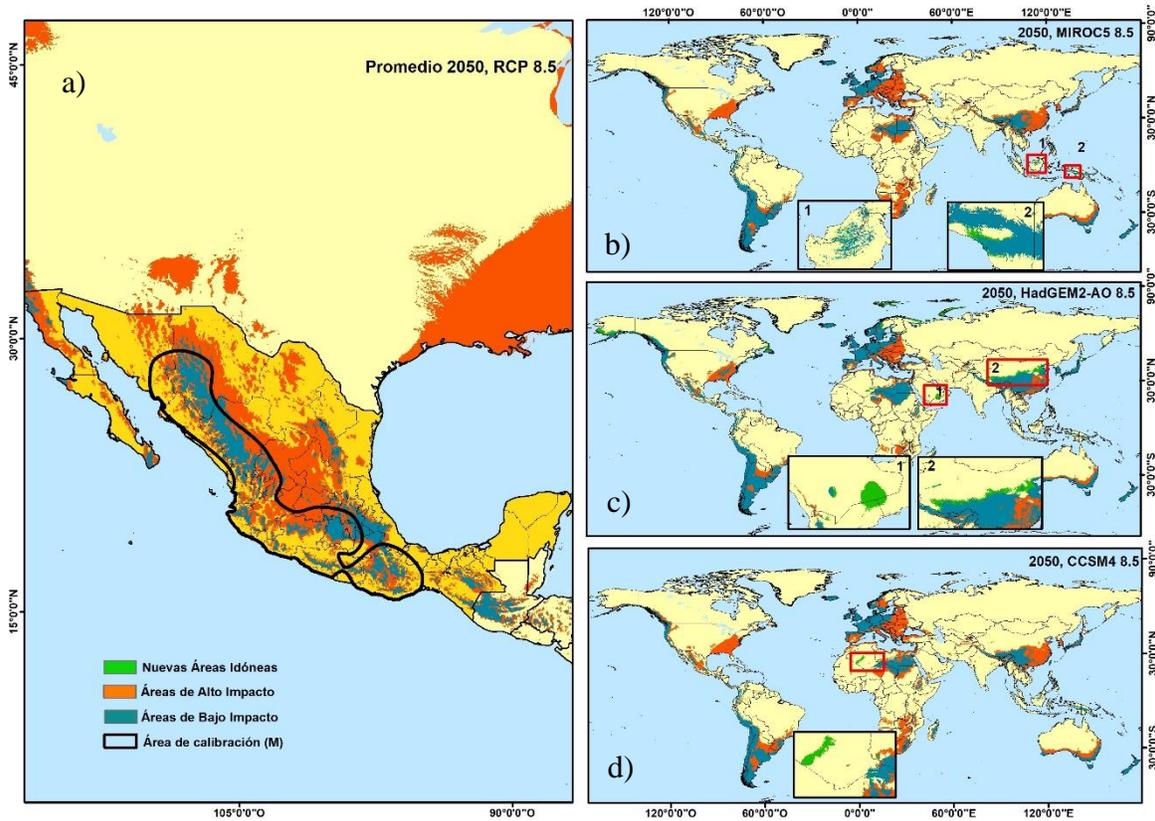


Figura 4. Clasificación de áreas de idoneidad predichas a través de máxima entropía al 2050 para *Pinus douglasiana* Martínez, utilizando las proyecciones climáticas de tres Modelos de Circulación General (MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4), a un RCP de 8.5.

Según Luján-Álvarez *et al.* (2015), el estado de Chihuahua es uno de los principales estados productores forestales; entonces se puede entender que presente las mayores cifras mencionadas anteriormente, por lo que el cambio en clima, afectara aquellas entidades indicadas en este estudio.

Tabla 5. Idoneidad climática (km²) de *Pinus douglasiana* Martínez al 2050 estimada a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en el área de calibración.

	MIROC5				HadGEM2-AO				CCSM4			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	AAI	ABI	AAI	ABI	AAI	ABI	AAI	ABI	AAI	ABI	AAI	ABI
Aguascalientes	4.14	1.46	4.5	1.1	3.66	1.94	3.8	1.8	2.1	3.5	5.07	0.52
B.C.N.	11.73	6.91	13.45	5.19	8.87	9.77	11.75	6.89	6.19	12.45	12.35	6.29
B.C.S.	28.15	9.45	31.45	6.15	17.16	20.44	18.38	19.22	12.33	25.27	25.21	12.39
Cd. México	0	1.48	0	1.48	0	1.48	0	1.48	0	1.48	0.52	0.96
Chiapas	13.19	12.47	13.51	12.15	8.77	16.88	12.07	13.59	9.37	16.28	15.78	9.87
Chihuahua	77.53	73.34	89.5	61.37	53.74	97.13	58.76	92.12	42.39	108.48	101.73	49.15
Coahuila	32.88	5.31	34.62	3.58	29.79	8.41	28.53	9.67	19.72	18.48	36.68	1.52
Colima	0.36	0.46	0.46	0.36	0.26	0.56	0.32	0.5	0.24	0.58	0.52	0.3
Durango	35.34	63.25	42.13	56.46	21.9	76.7	24.37	74.22	12.85	85.75	52.56	46.03
Guanajuato	18.5	11.83	22.38	7.95	14.82	15.5	14.28	16.04	11.57	18.76	28.33	2
Guerrero	7.65	10.29	9.37	8.57	6.37	11.57	7.83	10.11	6.11	11.83	10.79	7.15
Hidalgo	2.84	15.52	4.5	13.88	1.9	16.46	2.02	16.34	1.88	16.48	8.39	9.97
Jalisco	33.46	21.16	38.88	15.74	25.75	28.87	29.99	24.63	20.16	34.46	44.89	9.73
México	1.56	17.88	1.96	17.48	1.24	18.2	1.5	17.94	1.16	18.28	5.25	14.18
Michoacán	11.33	18.88	14.38	15.82	9.63	20.58	10.51	19.7	7.59	22.62	20.84	9.37
Morelos	0.46	0.64	0.52	0.58	0.36	0.74	0.46	0.64	0.34	0.76	0.6	0.5
Nayarit	5.91	7.11	7.25	5.77	3.94	9.09	5.67	7.35	3.64	9.39	8.53	4.5
Nuevo León	12.65	9.23	14.08	7.79	8.79	13.09	7.41	14.46	4.57	17.3	16.88	4.99
Oaxaca	17.06	28.53	20.8	24.79	11.85	33.74	15.16	30.43	13.01	32.58	25.01	20.58
Puebla	4.5	17.78	6.25	16.02	3.08	19.2	3.9	18.38	3.16	19.12	8.31	13.96
Querétaro	3.9	7.21	5.47	5.63	2.22	8.89	2.26	8.85	1.62	9.49	8.19	2.92
S.L.P.	36.48	8.23	39.62	5.09	32.88	11.83	31.17	13.55	24.47	20.24	43.01	1.7

Sinaloa	10.53	4.46	11.55	3.44	8.91	6.07	10.17	4.81	7.25	7.73	12.13	2.86
Sonora	37.08	3.78	39.1	1.76	30.33	10.53	34.94	5.91	23.19	17.66	38.82	2.04
Tabasco	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02	0.1	0.02
Tamaulipas	7.85	5.37	8.59	4.63	5.91	7.31	5.95	7.27	5.75	7.47	10.17	3.06
Tlaxcala	0	3.96	0	3.96	0	3.96	0	3.96	0	3.96	0.22	3.74
Veracruz	4.36	6.69	4.99	6.05	3.36	7.69	3.8	7.25	3.74	7.31	5.51	5.53
Zacatecas	41.21	25.51	48.09	18.64	33.24	33.48	34.52	32.2	17.18	49.55	57.78	8.95
Total	460.75	398.21	527.5	331.45	348.83	510.13	379.62	479.33	261.68	597.28	604.17	254.78

Donde: AAI = Áreas de alto impacto, ABI = Áreas de bajo impacto.

Tabla 6. Clasificación de áreas de idoneidad de *Pinus douglasiana* Martínez, a nivel global al 2050, predichas a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos vías de concentración representativas, RCP's 4.5 y 8.5.

Modelo de Circulación	Nuevas Áreas Idóneas (km ²)	Áreas de Alto Impacto (km ²)	Áreas de Bajo Impacto (km ²)	Superficie Total (km ²)
MIROC5 RCP 4.5	61,712	15,148,807	20,329,505	35,540,024
MIROC5 RCP 8.5	23,654	18,740,301	16,732,034	35,495,990
HadGEM2-AO RCP 4.5	3,225,366	9,392,039	26,101,595	38,719,001
HadGEM2-AO RCP 8.5	2,641,688	11,476,881	24,000,384	38,118,953
CCSM4 RCP 4.5	1,369,213	7,223,147	28,306,792	36,899,153
CCSM4 RCP 8.5	130,896	18,251,306	17,601,561	35,983,764

Incertidumbre de las predicciones y medidas de transferencia

La incertidumbre de las predicciones de la idoneidad climática de *P. douglasiana*, en el área de calibración es baja en su mayoría (CV de 0.7-11 %) en ambos RCP's (Figura 5a y b); en la periferia de M, el CV llega a alcanzar hasta 30 %. Resaltar que en las ABI (idóneas tanto en la actualidad como en el 2050), la incertidumbre varía desde 0.7-9 %, pero en las AAI (idóneas actualmente pero no en el 2050), el CV es más alto, desde 9-36 %. Lógicamente, en las regiones inaccesibles a la especie, el CV llega a ser de hasta 80 %. Es probable que la configuración del algoritmo implementado en este estudio produjo un modelo insesgado.

Al transferir el modelo de idoneidad de *P. douglasiana*, a otras regiones del mundo y al 2050, se observó la existencia de áreas con cierta similitud climática, incluso nuevas áreas idóneas

(Figura 3 y 4); sin embargo, el MOP discriminó casi la totalidad de ellas (Figura 5). Los resultados muestran de forma general que para ambos escenarios (RCP's) no hay áreas con extrapolación estricta en el área de calibración; es decir, valores climáticos fuera del rango del área de calibración. Owens *et al.* (2013) indican que el MOP da a conocer las áreas similares ambientalmente, reflejando más acertadamente la realidad de distribución para la especie, además calcula la similitud ambiental entre las regiones de calibración y proyección.

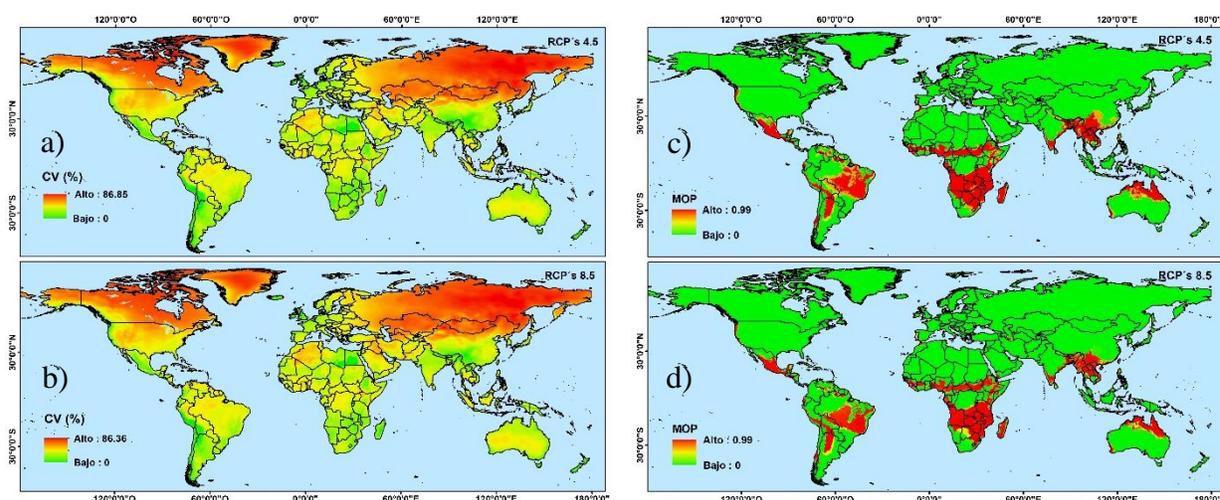


Figura 5. Incertidumbre promedio (coeficiente de variación) de predicciones de idoneidad de *Pinus douglasiana* Martínez, obtenida a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general (MCG) en los RCP 4.5 (a) y 8.5 (b) al 2050. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promedio de tres MCG, en el RCP 4.5 (c) y 8.5 (d).

Perfil bioclimático de *Pinus douglasiana* Martínez

Las variables que más contribuyeron al modelo de idoneidad fueron: Bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío) con 56.0 % y Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido) con 33.6 %; ambas con casi el 90 % de la contribución total, el resto (Bio 7, 12 y 15) aportaron solo 10.5 %. Enfatizando sobre las variables que más determinan las áreas de idoneidad de esta especie (Bio 11 y Bio 5), se observa que al 2050, en el área de calibración se espera un incremento de 1.4 y 1.8 °C en Bio 11, en tanto en Bio 5, el incremento es de 1.6 y 2.1 °C, en los RCP 4.5 y 8.5, respectivamente (Tabla 7). Estudiando esta misma especie, Aceves-Rangel *et al.* (2018) indican que la variable que mayor contribuye al modelo de idoneidad climática es Bio 10 (21.4%). Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) realizaron un estudio de modelación en los horizontes cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) de 12 especies donde se incluye *P. douglasiana* con un total de 11 registros, generando sus propias variables encontrado que Bio 6 es la de mayor contribución (92.3%), después Bio 5 (4.9%), evidenciando que no es la misma variable la que determina la distribución en los diferentes estudios, indudablemente es por la metodología y la escala del estudio.

Tabla 7. Contribución relativa de las variables al modelo de idoneidad de *Pinus douglasiana* Martínez, acorde a la prueba de Jackknife y perfil bioclimático detallado actual y futuro.

	n	Media	IC (media)	0.05	0.1	0.25	Mediana	0.75	0.90	0.95	Rango	DE	Vcoef	DMA	RIQ	
Var.	Contrib.	Perfil bioclimático actual														
Bio 5	33.6	321	260.55	±2.6	220.5	231.4	244.6	259.8	276.8	294.4	300.4	144.5	24.9	9.56	23.7	32.2
Bio 7	1.9	321	208.2	±3.6	141.5	169.9	191.4	206.6	224.6	260.5	273.1	165.7	34.7	16.67	24	33.1
Bio 11	56.0	321	120.3	±3.3	63.1	76.5	99.5	122.9	140.7	159.5	170.2	159.5	31.5	26.18	30.8	41.2
Bio 12	5.8	321	1116.9	±29.1	709.9	780.7	894.3	1099	1287.8	1521.9	1639	1243	280.3	25.1	298	393.5
Bio 15	2.8	321	98.5	±1.1	78.7	83.5	92.8	99.8	105.3	111.2	115.6	59.8	10.4	10.56	9.3	12.5
Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 4.5																
Bio 5	33.6	321	276.93	±2.6	235.53	245.9	260.77	276.33	294	310.3	317.47	146.33	25.33	9.15	24.97	33.27
Bio 7	1.9	321	220.5	±3.6	152.27	181.13	205.77	220.33	235.67	270.07	283.67	166.33	34.3	15.58	22.23	29.93
Bio 11	56.0	321	134.53	±3.1	80.77	93.8	114.77	136.17	153.67	172.87	183.07	152.33	30.07	22.35	28.43	38.93
Bio 12	5.8	321	1086.5	±28.6	683.43	754.97	864.60	1061.5	1265.5	1485.1	1577.57	1223.33	274.9	25.3	294.07	400.93
Bio 15	2.8	321	100.17	±1.1	82	86.9	94.33	100.67	106.33	113	116.4	56.67	9.94	9.93	9.13	12.33
Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 8.5																
Bio 5	33.6	321	281.77	±2.7	239.9	250.57	265.77	281.5	299.33	315.87	322.73	147.33	25.7	9.12	25.47	33.6
Bio 7	1.9	321	236.13	±3.7	166.97	196.83	220.77	235.67	251	286.73	267.78	169.33	34.95	14.83	22.71	30.27

Bio 11	56.0	321	138.87	±2.9	83.95	97.13	119.33	141	158.6	177.53	187.67	154.33	30.53	21.98	29.4	39.27
Bio 12	5.8	321	1092.23	±28.9	695.45	754.93	867.93	1067.17	1267.6	1502.27	1586.05	1253	277.83	25.42	293.56	399.7
Bio 15	2.8	321	99.58	±1.0	81.3	86	93.77	100.67	105.93	111.67	115	55.33	9.83	9.88	8.9	12.2
Diferencias climáticas entre periodo actual y 2050: RCP 4.5																
Bio 5			16.38	±0	15.03	14.5	16.17	16.53	17.2	15.9	17.07	1.83	0.43	-0.41	1.27	1.07
Bio 11			14.23	±0.2	17.67	17.3	15.27	13.27	12.97	13.37	12.87	-7.17	-1.43	-3.83	-2.37	-2.27
Diferencias climáticas entre periodo actual y 2050: RCP 8.5																
Bio 5			21.22	±0.1	19.4	19.17	21.17	21.7	22.53	21.47	22.33	2.83	0.8	-0.44	1.77	1.4
Bio 11			18.57	±0.4	20.85	20.63	19.83	18.1	17.9	18.03	17.47	-5.17	-0.97	-4.2	-1.4	-1.93

Donde: Cada variable bioclimática posee las unidades originales indicadas en la Tabla 1.

Una distribución normal o sesgada de las variables bioclimáticas definen adecuadamente el perfil bioclimático de una especie, en este estudio se observó que las variables de mayor contribución muestran una distribución cercana a la normal, al futuro, la tendencia es muy similar. El desplazamiento de las curvas hacia la parte derecha, debida a los cambios climáticos al 2050, son evidentes en ciertos MCG (Figura 6), incremento de temperatura y disminución de precipitación (Tabla 7) en el área de calibración se espera para el 2050. La importancia de conocer cuál es el comportamiento de la especie hacia los factores climáticos radica en la toma de decisiones para determinar estrategias de manejo y conservación para mitigar los efectos negativos (Rios-Altamirano *et al.*, 2016).

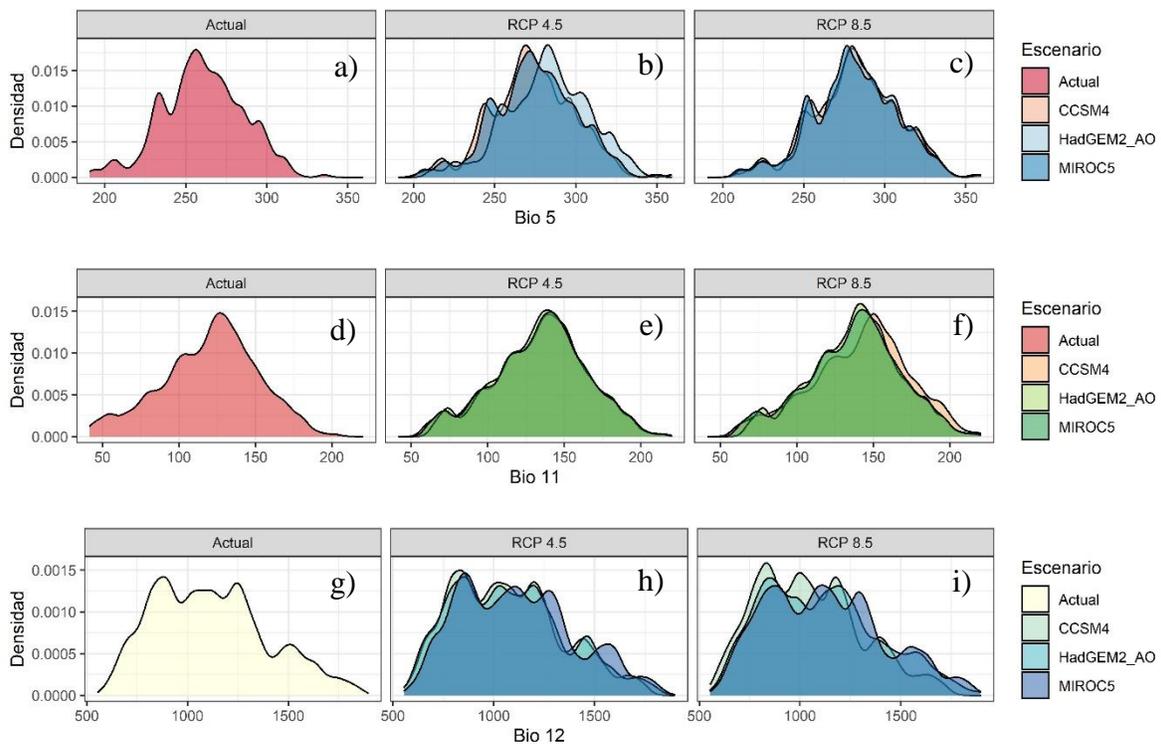


Figura 6. Histograma de densidad de tres variables que más contribuyeron al modelo de idoneidad climática de *Pinus douglasiana* Martínez. Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido), Bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío) y Bio 12 (Precipitación anual).

Respuesta de las variables a la idoneidad climática

Uno de los criterios al seleccionar un modelo de idoneidad y del tipo de modalidad al hacer la transferencia del modelo a nuevas áreas o en tiempos, es el tipo de respuesta (extrapolación libre, extrapolación clamping y sin extrapolación), en este sentido, la respuesta de las variables seleccionadas por el modelo fue cuadráticas, en ningún caso fue lineal, lo que biológicamente es correcto. Es evidente la contribución de variables (Tabla 7), en explicar la idoneidad climática de *P. douglasiana*; a mayor contribución de la variable mayor correlación y viceversa. Por la inclusión de múltiples Bios al modelo y de diferentes características, la relación resultó negativa para Bios de temperatura (Figura 7a y b) y positiva para Bios de precipitación (Figura 7c y d); es decir, la idoneidad climática de esta especie, es mayor con valores bajos de Bio 5 y Bio11, por el contrario, altos valores de precipitación en Bio 12 y Bio 15, mayor idoneidad climática.

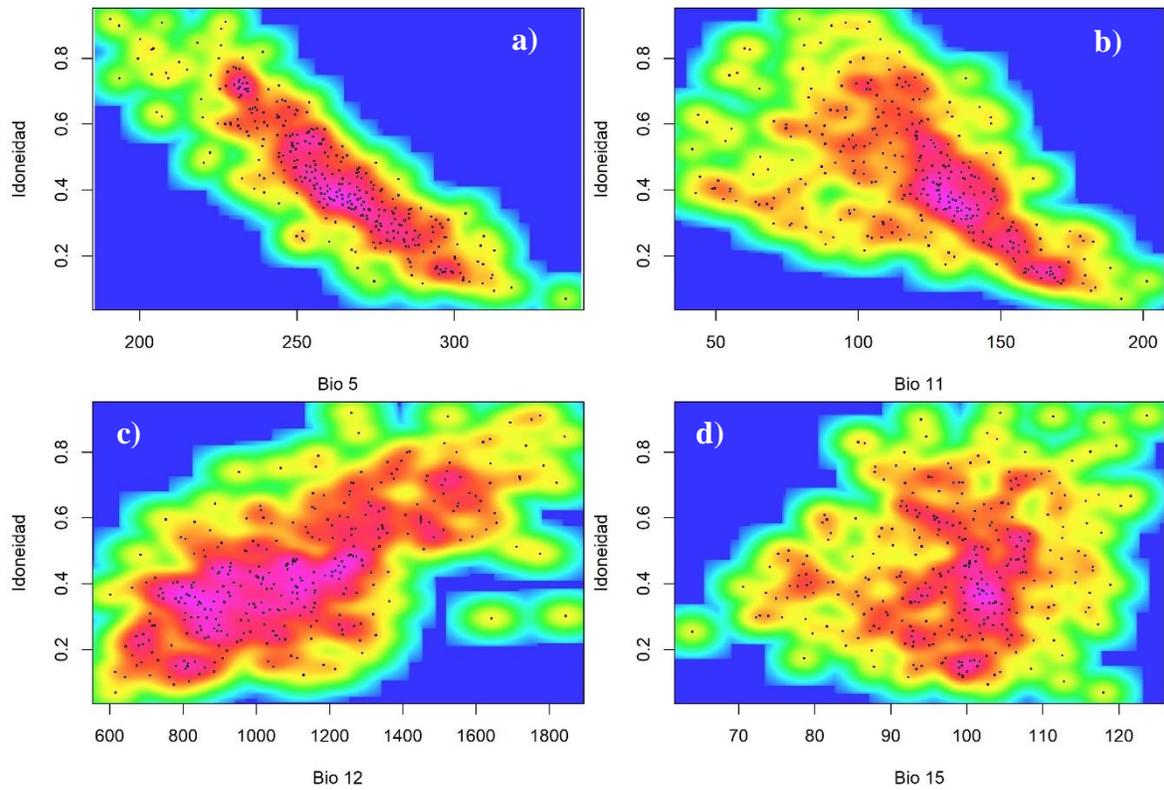


Figura 7. Respuesta de las variables bioclimáticas a la idoneidad climática predicha a través de máxima entropía para *Pinus douglasiana* Martínez, usando extrapolación libre. Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido), Bio 11 (Temperatura media del trimestre más frío), Bio 12 (Precipitación anual) y Bio 15 (Estacionalidad de la precipitación). Los círculos negros representan los registros totales de la especie (entrenamiento y validación).

V. CONCLUSIONES

La selección adecuada de registros de presencia de la especie, de variables bioclimáticas y de parámetros en el algoritmo de modelación, dan gran certeza de generar de un modelo predictivo insesgado. Índices extremos de temperatura: Bio 11 (temperatura media del trimestre más frío) y Bio 5 (temperatura máxima del mes más cálido) determinan la idoneidad climática de esta especie, en una relación positiva. El algoritmo de máxima entropía, predice reducción de las áreas de alta idoneidad (>0.54) al 2050 dentro del área de calibración, en promedio -63.74 %. Aunque el modelo predice nuevas áreas idóneas en pequeñas regiones en diferentes partes del mundo, la métrica de validación de transferencia del modelo (MOP) demostró que el nicho ambiental es diferentes al del área de calibración. La especie *Pinus douglasiana* Martínez es susceptible al cambio climático; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que plantea que el cambio climático no tiene efectos sobre la distribución potencial de la especie.

VI. RECOMENDACIONES

La metodología que se ha implementado en este estudio puede aplicarse a diferentes áreas de la ecología distribucional, esto, se puede afirmar de acuerdo a la literatura, ya que se han hecho estudios de modelación con diferentes fines.

En base a los resultados encontrados, es imperante que las instituciones correspondientes planifiquen y generen estrategias programas de manejo y de conservación de la especie en las zonas indicadas como de alto impacto, pues son áreas que al 2050 podrían perderse, aunado a que no se predicen nuevas áreas idóneas para esta especie.

Es recomendable probar más modelos de circulación general para determinar cuáles son los que mejor predicen la idoneidad climática de las especies en estas regiones geográficas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, *52*, 1043–1057.
- Aguirre, G. J., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *81*(3), 875–882.
- Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chávez, H. M., Villalobos Arámbula, A. R., Pérez de la Rosa, J. A., & Raes, N. (2015). Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely – related Mexican white pines. *Diversity and Distributions*, *21*, 245–257. <https://doi.org/10.1111/ddi.12268>
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, *38*, 541–545. <https://doi.org/doi.org/10.1111/ecog.01132>.
- Alfaro-Ramírez, F. U., Ramírez- Alborez, J. E., Vargas-Hernández, J. J., Franco- Maass, S., & Pérez-Suárez, M. (2020). Potential reduction of Hartweg´s Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE*, *15*(2), 1–18. <https://doi.org/doi.org/10.1371/journal.pone.0229178>
- Anderson, R. P., & Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution:

- Preliminary tests with montane rodents (*genus Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37(7), 1378–1393. [https://doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x)
- Avello Martínez, R., & Seisdedo Losa, A. (2017). El procesamiento estadístico con R en la investigación científica. *MediSur*, 15(5), 583–586.
- Ávila Coria, R., Villavicencio García, R., & Ruiz Corral, J. A. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24), 92–109. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i24.322>
- Bernaola Paucar, R. M., Zamora Natera, J. F., Vargas Radillo, J. D. J., Cetina Alcalá, V. M., Rodríguez Macías, R., & Salcedo Pérez, E. (2015). Calidad de planta en etapa de vivero de dos especies de pino en sistema Doble-Trasplante. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33), 74–93.
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 1–15. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (s.f.). *Pinus douglasiana* Martínez. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/958Pinus%20douglasiana.pdf>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F. y López-Sandoval, J. A. (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.

- Csárdi, G., Müller, K., & Hester, J. (2018). Package “desc.” UTC. <https://github.com/r-lib/desc#readme>
- Díaz, C. G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII (2), 227–240.
- Escobar, L. E., Lira-noriega, A., Medina-Vogel, G., & Peterson, A. T. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221–229.
- Farjon, A., Pérez de la Rosa, J., & B. T. Styles, (1997). Una guía de campo de los pinos de México y Centroamérica. *Royal Botanic Gardens*, 1–147.
- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3–13. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1396>
- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J. M., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Toledo, J. F., Domínguez-Álvarez, F. A., & Sáenz-Romero, C. (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences*, 94(1), 43–50. <https://doi.org/10.17129/botsci.500>
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>

- Graham, M. G. (2003). Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, *84*, 2809–2815.
- Guerrero Escamilla J. B., Rangel Martínez, Y. & López Pérez, S. (2017). Predicción del calentamiento global mediante el desarrollo de un modelo de series de tiempo. *Ambiente y Desarrollo*, *21*(40), 125–139.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, *135*, 147–186.
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *85*, 179–188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Harrison, S. P., Bartlein, P. J., & Prentice, I. C. (2016). What have we learnt from palaeoclimate simulations?, *Journal of Quaternary Science*, *31*(4), 363–385.
- Hirzel AH & GL Lay (2008). Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, *45*, 1372–1381.
- Hutchinson, G E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, *22*, 415–427.
- Ihaka, R & R Gentleman. (1996). R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, *5*(3), 299–314.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*, 1–20. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>

- Klohn, W., & Faurés, J.-M. (2006). Water for food, agriculture and rural livelihoods. *Water for Food, Agriculture and Rural Livelihoods*, 243–274.
- Kumar S, & Stohlgren T.J. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1, 94–98.
- Lawler J.J., Shafer S.L., White D., Kareiva P., Maurer E.P., & Blaustein A.R. (2009) Projected climate-induced faunal change in the western hemisphere. *Ecology*, 90, 588–597.
- Lobo JM, Jiménez-Valverde A, Real R. 2007. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17:145–151 DOI 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x.
- Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., González-Hernández, H. G., Vázquez-Álvarez, S., Hernández-Díaz, J. C., & Luján-Álvarez, H. (2015). Forestería comunitaria en México: modelo estratégico para empoderamiento y competitividad en la globalización. *Economía, Sociedad y Territorio*, 15(49), 665–696.
- Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., & Gay, C. (1997). Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research*, 9, 107–114.
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O’Connor, F. M., Roberts, M. J., Rodriguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., ... Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of Met

- Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (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), 5–24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez-Meyer, E., Díaz-Porras, D., Townsend, P. y Yáñez-Arenas, C. (2013). Ecological niche structure and rangewide abundance patterns of species. *Biology Letters*, 9, 1–5.
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217–240.
- Meentemeyer RK, Anacker BL, Mark W, & Rizzo DM (2008). Early detection of emerging forest disease using dispersal estimation and ecological niche modeling. *Ecological Applications*, 2, 377–90.
- Miller, T. G. (2007). Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral. *Thomson Editores, México*.
- Naoki, K., Gómez, M. I., López, R. P., Meneses, R. I., & Vargas, J. (2006). Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41(1), 65–78.
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E., & Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on

- calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>
- Pearson, Richard. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361–371.
- Perry, J. P. (1991). The Pines of Mexico and Central America. *Timber Press, Inc*, 231.
- Peterson, A. T. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, 3, 59–72. <https://doi.org/10.17161/bi.v3i0.29>
- Phillips, S. J., & Dudik, M. (2008). Modeling of species distribution with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31, 161–175.
<https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Raynal-Villaseñor, J.A. (2011). Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(4), 421–427.
- Reddy, K. G., & Khan, M. G. M. (2020). StratifyR: An R Package for optimal stratification and sample allocation for univariate populations. *Revista de Estadísticas de Australia y Nueva Zelanda*, 62(3), 383–405. <https://doi.org/10.1111/anzs.12301>

- Reddy, K. G., Khan, M. G. M., & Khan, S. (2018). Optimum strata boundaries and sample sizes in health surveys using auxiliary variables. *PLoS ONE*, *13*, 1–34. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194787>
- Ríos-Altamirano, A., Alfonso-Corrado, C., Aguirre-Hidalgo, V., Ángeles-Pérez, B., Mendoza-Díaz, M. M., Rodríguez-Rivera, V., Roldan-Félix, E., & Clark-Tapia, R. (2016). Abundancia y distribución del género *Pinus* en Capulálpam de Méndez, Sierra Juárez, Oaxaca. *Madera y Bosques*, *22*, 61–74.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*, *93*(4), 709–718. <https://doi.org/10.17129/botsci.86>
- Sánchez González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, *14*(1), 107–120.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). Anuarios Estadísticos de la Producción Forestal. México, D.F., México. 176 p. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales>.
- Soberón, J., & Peterson T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, *2*, 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *88*, 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>

- Thuiller, W. (2003). BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology*, 9, 1353–1362.
- Torres-Rojo, J. M. (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional México. FAO. 86. <https://doi.org/http://www.ecured.cu/Pinus>
- Vázquez, D. P. (2005). Reconsiderando el nicho hutchinsoniano. *Ecología Austral*, 15, 149–158.
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (2000). El cambio climático y la vegetación en México. *México: una Visión Hacia el Siglo XXI*, 57–66.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O’Ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., CHikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312–6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>
- Wickham, H. (2011). ggplot2. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 3, 180–185. <https://doi.org/10.1002/wics.147>.
- Wilson, K. A., Westphal, M. I., Possingham, H. P., & Elith, J. (2005). Sensitivity of conservation planning to different approaches to using predicted species distribution data. *Biological Conservation*, 122, 99–122.

- Wisz, M.S., Hijmans, R.J., Li, J., Peterson, A.T., Graham, C.H., & Guisan, A. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14, 763–773.
- Yeaton, R. I. 1982. The altitudinal distribution of the genus *Pinus* in the western United States and Mexico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 42, 55–71.
- Zonneveld, M. Van, Koskela, J., Vinceti, B., & Jarvis, A. (2009). Repercusiones del cambio climático en la distribución de los pinos tropicales en Asia sudoriental. *Unasylva*, 60, 231–232.
- Zorita, E., & Storch, H. Von. (1991). Estimación de cambios en la precipitación en la península Ibérica a partir de expertos con modelos de circulación general. *Física de La Tierra*, 3, 399–414.