

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Distribución Actual Y Potencial De *Pinus pseudostrobus* Lindl Bajo Escenarios De Cambio
Climático

Por:

JOSÉ GIL SOLÍS RUIZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Distribución Actual Y Potencial De *Pinus pseudostrobus* Lindl Bajo Escenarios De Cambio Climático

Por:

JOSÉ GIL SOLÍS RUIZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



MC. Héctor Darío González López

Coasesor



Ing. José Oscar Manuel López Díaz

Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes

Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2021



Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

José Gil Solís Ruiz

Dedicatorias

A Dios quien es el guía de mi vida.

A mis padres Gil Solís García y Claudia Ruiz Carpio por haberme forjado como la persona que soy, por estar a mi lado, por su apoyo moral, por su entusiasmo para salir adelante y por todo su cariño y esfuerzo que hacían día a día para apoyarme incondicionalmente a lo largo de esta etapa.

A mis hermanos Ana Laura Solís Ruiz y Juan Sebastián Solís Ruiz por su apoyo y consejos que me brindaron durante todo este tiempo.

“Esto es de ustedes y para ustedes, los quiero”

Agradecimientos

A mi Alma Mater por darme la oportunidad de convertirme en un profesionalista de calidad.

Al departamento Forestal y a cada uno de los profesores que lo conforman por brindarme los conocimientos requeridos para concluir esta etapa.

Al Dr. Jorge Méndez González por creer en mi para realizar este trabajo y por su apoyo para realizarlo y concluirlo.

Al Ing. José Óscar Manuel López Díaz por su apoyo desde el inicio de este trabajo.

Al M.C Héctor Darío González López por su apoyo en la revisión del presente trabajo.

Al Dr. Genaro Esteban García Mosqueda por sus consejos y apoyo a lo largo del periodo de la universidad.

A mis amigos y compañeros Marco Antonio Vera Méndez, Víctor Manuel Lira Moreno, Roberto Carlos Vázquez García, Eric Berteli Santizo Morales, Rafael Emanuel Carranza Morales, Amador Silverio Martínez Reyes y María de Lourdes Gómez Ruiz por sus amistad y apoyo a lo largo del periodo de la universidad. Y cada uno mis compañeros de generación por su compañía y buenos momentos que pasamos dentro y fuera del salón de clases.

A María Guadalupe Claudio Luna por la motivación brindada y su compañía durante la realización y culminación de este trabajo.

A mis amigos Ivan Domínguez Guevara, Jose Luis Juárez Romero, Rey David Domínguez Martínez y Raúl Guevara que a pesar de no estar cerca durante todo este tiempo siempre conté con su apoyo.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| RESUMEN | X |
| ABSTRACT..... | XI |
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 1.2. Objetivo general..... | 2 |
| 1.3. Objetivos específicos | 2 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| 2.1. Área de distribución y descripción de la especie | 3 |
| 2.2. Importancia de la especie..... | 3 |
| 2.3. Modelos de distribución de especies | 3 |
| 2.4. Distribución de especies | 4 |
| 2.5. Nicho ecológico | 5 |
| 2.6. Cambio climático..... | 6 |
| 2.7. Modelos de circulación general | 7 |
| 2.8. Trayectorias de concentración representativas | 7 |
| 2.9. Algoritmo y software aplicado en la modelación | 7 |
| 2.9.1. Maxent | 7 |
| 2.9.2. Software R | 8 |

| | |
|---|----|
| 2.10. Estudios sobre distribución de especies | 8 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| 3.1. Registros de presencia de la especie | 12 |
| 3.2. Variables bioclimáticas y selección | 12 |
| 3.3. Área de calibración (M) | 13 |
| 3.4. Proceso de modelación | 13 |
| 3.5. Selección del modelo | 14 |
| 3.6. Estratificación de los mapas de idoneidad | 14 |
| 3.7. Transferencia del modelo (MOP) | 15 |
| 3.8. Áreas idóneas para el futuro | 15 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 16 |
| 4.1. Modelo de idoneidad | 16 |
| 4.2. Áreas de idoneidad para <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl | 18 |
| 4.3. Nuevas áreas idóneas y áreas de alto y bajo impacto | 24 |
| 4.4. Incertidumbre de las predicciones | 30 |
| 4.5. Transferencia del modelo (MOP) | 31 |
| 4.6. Perfil bioclimático de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl | 32 |
| 4.7. Respuesta de las variables bioclimáticas | 36 |
| 5. CONCLUSIONES | 38 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA | 39 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de idoneidad actual (a) para *Pinus pseudostrobus* Lindl, estratificado en baja, media y alta, y distribución potencial de la especie, usando proyecciones climáticas al 2050 de tres modelos de circulación general: CCSM4 (b y c), HADGENM (d y e) y MIROC5 (f y g), en dos trayectorias de concentración 4.5 (b - f) y 8.5 (c - g).....19
- Figura 2.** Clasificación de áreas de idoneidad estimadas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 4.5.....24
- Figura 3.** Clasificación de áreas de idoneidad estimas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 8.5.....25
- Figura 4.** Relación de idoneidad actual con la altitud (a) y distribución altitudinal de los registros de presencia en áreas estimadas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, al 2050 (b).....28
- Figura 5.** Diferencia de valores bioclimáticos actuales y futuros de las variables utilizadas para modelo de nicho ecológico de *Pinus pseudostrobus* Lindl (RCP 4.5).30
- Figura 6.** Incertidumbre promedio de las predicciones de idoneidad para *Pinus pseudostrobus* Lindl, promedio de tres modelos de circulación general (CCSM4, HADGENM y MIROC5) y dos RCP's 4.5 (a) y 8.5 (b).31
- Figura 7.** Paridad Orientada a la Movilidad para el modelo de nicho ecológico de *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general (CCSM4, HADGENM y MIROC5), en dos RCP's 4.5 (a) y 8.5 (b).....32
- Figura 8.** Espacio ambiental de *Pinus pseudostrobus* Lindl, elaborado con Bio 12 (Precipitación, mm), Bio 1 (Temperatura, °Cx10) y 1933 registros con elipse al 95 %. Los puntos rojos corresponden al área de distribución de la especie (NR) y los puntos grises corresponden a sitios con ambientes fuera del nicho de la especie y la intercepción del nicho fundamental con el espacio ecológico disponible (NP).....33
- Figura 9.** Respuesta de las variables bioclimáticas de acuerdo con la idoneidad, Bio 1(Temperatura media anual °C), Bio 4 (Temporalidad de la temperatura °C), Bio 5

(Temperatura máxima del mes más cálido °C), Bio 7 (Intervalo de temperatura anual °C), Bio 11 (Temperatura media del 1/4 anual más frío °C), Bio 13 (Precipitación del mes más húmedo mm) para *Pinus pseudostrobus* Lindl.37

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Variables utilizadas para generar los mapas de distribución actual y futuro de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl..... | 13 |
| Tabla 2. Número de modelos candidatos generados y estadísticos de ajuste y validación. | 17 |
| Tabla 3. Superficie de idoneidad actual para <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl, estratificada (baja, media y alta) para cada estado de México o país aledaño. | 21 |
| Tabla 4. Tasa de cambio porcentual de la superficie de idoneidad actual con respecto a las estimaciones para el año 2050 para <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl, utilizando el modelo de nicho con las proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general. | 23 |
| Tabla 5. Idoneidad climática de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl al 2050, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en el área de calibración (M). | 25 |
| Tabla 6. Idoneidad climática de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl al 2050, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en México y países aledaños. | 26 |
| Tabla 7. Contribución de variables bioclimáticas al modelo de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl y perfil bioclimático actual y futuro para ambos RCP's..... | 34 |
| Tabla 8. Contribución y valores de las variables bioclimáticas en las Áreas de bajo impacto al 2050 para ambos RCP's..... | 35 |

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue modelar la distribución actual y potencial de *Pinus pseudostrobus* Lindl. utilizando 15 variables bioclimáticas actuales y futuras (2050) de tres modelos de circulación general (GCM): CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5, en dos vías de concentración de CO₂ (RCP's 4.5 y 8.5) y 999 registros de presencia de la especie. La creación, calibración, evaluación del modelo y el riesgo de extrapolación se realizó en “kuenm” un paquete de R que utiliza a Maxent como algoritmo de modelación. Se crearon 3636 modelos candidatos, de los cuales se seleccionó uno bajo los criterios establecidos. El modelo seleccionado tiene una respuesta cuadrática, en donde las variables que determinan la idoneidad climática de la especie son: Bio 1, Bio 5, Bio 4, Bio 7, Bio 11 y Bio 13 contribuyendo al modelo el 53.9, 32.0, 11.3, 0.1, 1.3 y 1.5 % respectivamente. Para el año 2050 el modelo predice una reducción de áreas con alta idoneidad de -72.96 % promedio e idoneidad media de -44.64 % promedio dentro del área de calibración, mientras que las áreas con baja idoneidad muestran una ganancia de 11.08 %. La modelación muestra que para México al año 2050 no tendrá nuevas áreas idóneas, las áreas de alto impacto tendrán una extensión entre 112,488.57 y 140,758.84 km² (RCP 4.5 y 8.5) y las áreas de bajo impacto (con idoneidad actual y al 2050) tendrán una extensión de 140,947.66 y 112,938.77 km² (RCP 4.5 y 8.5). A nivel mundial en ambos RCP's se presentan nuevas áreas idóneas principalmente en el sur de Alaska y el norte de Islandia, sin embargo, la Paridad Orientada a la movilidad las excluye casi en su totalidad.

Palabras clave: Distribución potencial, kuenm, variables bioclimáticas, vías de concentración de CO₂.

ABSTRACT

The objective of this study was to model the current and potential distribution of *Pinus pseudostrabus* Lindl, using 15 current and future bioclimatic variables (2050) from three general circulation models (GCM): CCSM4, HadGEM2-AO and MIROC5, in two concentration pathways. of CO₂ (RCP's 4.5 and 8.5) and 999 records of presence of the species. The creation, calibration, evaluation of the model and the risk of extrapolation was carried out in “Kuenm” an R package that uses Maxent as a modeling algorithm. 3,636 candidate models were created, of which one was selected under the established criteria. The selected model has a quadratic response, where the variables that determine the climatic suitability of the species are: Bio 1, Bio 5, Bio 4, Bio 7, Bio 11 and Bio 13 contributing to the model on 53.9, 32.0, 11.3, 0.1, 1.3 and 1.5% respectively. For the year 2050, the model predicts a reduction of areas with high suitability of -72.96% average and average suitability of -44.64% average within the calibration area, while areas with low suitability show a gain of 11.08%. The modeling shows that for Mexico by the year 2050 it will not have new suitable areas, the high impact areas will have an extension between 112,488.57 and 140,758.84 km² (RCP 4.5 and 8.5) and the low impact areas (with current suitability and by 2050) will have an extension of 140,947.66 and 112,938.77 km² (RCP 4.5 and 8.5). At a global level in both RCPs, new suitable areas are presented mainly in southern Alaska and northern Iceland, however, Mobility Oriented Parity excludes them almost entirely.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La emisión de gases efecto invernadero hacia la atmósfera debido a las actividades humanas, ha provocado un incremento de temperatura de 1 °C en los últimos años (Infante, 2019), desafortunadamente, esto está afectando la distribución de las especies (Soberón y Peterson, 2005), las posibles modificaciones podrían verse reflejadas en los límites de tolerancia fisiológica de las especies, también conocido como amplitud de nicho (Broennimann *et al.*, 2006). Es decir; la distribución de una especie está limitada por restricciones fisiológicas dada su tolerancia ambiental a temperatura y humedad, resultado de procesos evolutivos y han determinado su presencia en ciertos lugares (Wiens y Graham, 2005), si una de estas variables excede el grado de tolerancia su ciclo se interrumpe (Gutiérrez y Trejo, 2014).

El área de distribución se define como el espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa con el ecosistema (Zunino y Palestrini, 1991). En este sentido, los modelos de nicho ecológico (MNE) y de distribución de especies (MDE) se han utilizado para predecir los cambios probables en la distribución de las especies bajo escenarios de cambio climático (Peterson, 2006). Conceptualizando, el MNE es un hipervolumen multidimensional en donde engloba a todos los factores bióticos y abióticos con los cuales una especie es capaz de persistir y mantener un tamaño de población estable (Illoldi y Escalante, 2008; Soberón *et al.*, 2017). Los MDE son representaciones de la idoneidad de un área para la presencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación (Mateo *et al.*, 2011). Desarrollar MNE y MDE requiere de conocimiento previo de conceptos (Soberón *et al.*, 2017), registros de presencia de la especie, variables predictivas (Busby, 1986) y desde luego del desempeño del algoritmo a utilizar (Elith *et al.*, 2006).

Los bosques templados de México representan 13 % (255,368 km²) del país (Challenger y Soberón, 2008), en estos ecosistemas, predomina el género *Pinus*, y en el país se cuenta con 49 de las 120 especies de pino descritas (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). México es el

país con mayor riqueza de especies del género *Pinus* (Farjon *et al.*, 1997). *Pinus pseudostrabus* Lindl es una de las especies de pino de importancia en el país (Hernández *et al.*, 2003), es originario de México, Guatemala y Honduras, de las más ampliamente distribuidas, en 21/32 estados de México (Aceves-Rangel *et al.*, 2017), solo en Campeche, Tabasco y Yucatán, no existen registros de *Pinus*.

Quizá por ser una de las especies más importantes en México, de usos múltiples, como aserrío, resina hasta plantaciones forestales comerciales (Viveros-Viveros *et al.*, 2005) en *P. pseudostrabus* se ha desarrollado modelos de nicho ecológico con diferentes objetivos: Unidades Productoras de Germoplasma (Reynoso *et al.*, 2018; Barrera *et al.*, 2020), Biodiversidad, distribución y estado de conservación (Ramos-Dorantes *et al.*, 2017; Manzanilla *et al.*, 2018) y para estudiar la distribución de especie (Téllez *et al.*, 2020; Cruz *et al.*, 2016); Aceves *et al.*, 2017), la mayoría de estos estudios son a escala local, regional, y solo uno (Cruz *et al.*, 2016) modela hacia el futuro, pero es a escala local, no considera toda la distribución de la especie.

1.1. Objetivos

1.2. Objetivo general

Evaluar el efecto del cambio climático en la distribución actual y futura (2050) de *P. pseudostrabus*.

1.3. Objetivos específicos

Generar un modelo de nicho ecológico robusto para determinar la distribución actual y futura de la especie utilizando dos vías de emisiones de CO₂ (RCP): drástico (RCP 8.5) y moderado (RCP 4.5) de tres modelos de circulación general (MCG) MIROC5, HadGEM2-AO y CCSM4.

Determinar nuevas áreas idóneas, áreas de bajo impacto y áreas de alto impacto para *P. pseudostrabus* en base a las proyecciones climáticas al 2050.

Establecer el perfil bioclimático de *P. pseudostrabus* y determinar las variables que se asocian con la distribución de la especie.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Área de distribución y descripción de la especie

Esta especie llega a medir 40 m de altura y diámetro de hasta 80 cm, se distribuye desde 1600 hasta 3250 msnm, donde ocurren entre 800 y 1500 mm de lluvia y temperatura de 18 a 21 °C (Perry, 1991; Vozzo, 2002). Se desarrolla sobre suelos volcánicos y calcáreos, en climas templados a templados cálidos (Vozzo, 2002).

2.2. Importancia de la especie

Pinus pseudostrobus es una especie de importancia económica, por su crecimiento relativamente rápido, buena forma del fuste, excelente producción de resina y excelente calidad madera para la producción de triplay, chapa, papel, celulosa y cajas de empaque, entre otros usos (Hernández *et al.*, 2003; Muñoz *et al.*, 2019), por lo cual es una especie apropiada para el establecimiento de plantaciones comerciales además de ser ampliamente utilizadas en programas de reforestación y plantaciones con carácter de investigación a nivel nacional e internacional (CATIE, 1997; Viveros-Viveros *et al.*, 2005).

2.3. Modelos de distribución de especies

Los modelos de distribución se definen como representaciones cartográficas de la idoneidad de un área para la presencia de una especie en función de las variables empleadas, estas variables pueden ser geológicas, topográficas o climáticas (Mateo *et al.*, 2011).

Los sistemas de información geográfica (SIG) y el constante desarrollo de técnicas estadísticas aplicadas han permitido el análisis de los patrones espaciales de presencia y ausencia de especies (Guisan y Zimmermann, 2000).

Se ha utilizado a los modelos de distribución de especies y modelos de nicho ecológico como dos terminologías para referirse a las asociaciones ambientales de las especies y las relaciones de estas asociaciones con su distribución geográfica (Peterson y Soberón, 2012).

Los modelos de distribución de especies se han convertido en una de las áreas de investigación con mayor desarrollo para la biogeografía (Richardson y Whittaker, 2010). Para la biogeografía el estudiar los patrones de distribución espacial de los seres vivos ha sido uno de sus puntos centrales. Los avances que se han tendido han permitido establecer una relación entre distribución geográfica de las especies y la distribución espacial del clima (Pliscoff y Fuentes, 2011).

En la década de los 70's se iniciaron los primeros modelos teóricos que buscaban definir el nicho en términos de distribución espacial (Kessell, 1979). En el transcurso de la década de los 80's se comenzaron a generar las primeras predicciones a distintos niveles de organización (Pliscoff y Fuentes, 2011). En los últimos años se ha observado un desarrollo progresivo en la creación de programas que nos dan la oportunidad de modelar el nicho ecológico de las especies (Illoldi y Escalante, 2008). Los métodos que se han desarrollado y utilizado para modelar la distribución de las especies han sido bastantes y pueden ser simples delimitando el contorno del área de distribución o más complejos como el uso de métodos cuantitativos (Sánchez *et al.*, 2001). La modelación de distribución de especies es una herramienta importante para afrontar problemas de conservación y cambio climático (Guisan y Thuiller, 2005).

2.4. Distribución de especies

El área de distribución de las especies es un concepto importante y existen casos en los que no se ha interpretado de una forma adecuada (Maciel-Mata *et al.*, 2015). El área de distribución se define como el espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa con el ecosistema (Grinnell, 1917; Zunino y Palestrini, 1991), la cual está definida por factores biogeográficos, fisiológicos y ecológicos (Maciel-Mata *et al.*, 2015).

En primer lugar, la distribución de una especie está limitada por sus restricciones fisiológicas dada su tolerancia ambiental a la temperatura y la humedad, que es resultado los procesos evolutivos y han determinado su presencia en ciertos lugares (Wiens y Graham, 2005). El

área de distribución de las especies puede ser afectado por el cambio climático, ocasionado por el incremento de la temperatura, las posibles modificaciones podrían verse reflejadas en los límites de tolerancia fisiológica de las especies, también conocido como amplitud de nicho (Broennimann *et al.*, 2006). De tal manera que una especie con un nicho amplio puede mostrar reducción de su área de distribución si las condiciones se vuelven desfavorables y una especie con un nicho de amplitud estrecha puede expandir su área de distribución si las condiciones se vuelven favorables (Vié *et al.*, 2009), si las especies no se adaptan a los cambios o tienen un intervalo de tolerancia restringido deberán desplazarse o dar paso al proceso de extinción (Peterson *et al.*, 2001; Foden *et al.*, 2007).

El ambiente biótico es un conjunto de factores que también determina la localización de las especies en el espacio geográfico, algunos de ellos son: especies competidoras, depredadoras y patógenas, la disponibilidad de recursos y la dinámica demográfica de las poblaciones (Soberón, 2007).

Finalmente, los factores biogeográficos podrían limitar la expansión de su área de distribución de las especies (Brown, 2003), o bien algunas poblaciones podrían ser sometidas a condiciones restrictivas dando origen a una nueva especie con una distribución geográfica puntual y fragmentando el área original ocupada por la especie original (Bridle y Vines, 2007).

2.5. Nicho ecológico

El nicho ecológico es un hipervolumen multidimensional en donde engloba a todos los factores bióticos y abióticos con los cuales una especie es capaz de persistir y mantener un tamaño de población estable (Hutchinson, 1957; Illoldi y Escalante, 2008). Dentro del nicho ecológico de una especie se distingue el nicho fundamental y el nicho realizado, en donde el primero hace referencia a las condiciones bióticas en donde la especie puede vivir y la segunda hace referencia a las condiciones ambientales en el área y las interacciones biológicas (Hutchinson, 1957). Por lo cual una especie estará presente en sitios donde las condiciones bióticas y abióticas le permitan mantener o incrementar su abundancia y su presencia podrá ser tan amplia como lo sea su nicho fundamental (Pulliam, 2000).

2.6. Cambio climático

A lo largo del tiempo el clima ha experimentado numerosos cambios que obedecen a ciclos dinámicos naturales (Lorente *et al.*, 2004). Son bastantes los datos y pruebas científicas sobre la existencia o no del cambio climático (Montoya, 1995). Sin embargo, no es tanto la magnitud del cambio como la velocidad con la que se está produciendo o puede producirse (Perry, 1994).

El cambio climático se puede definir como el resultado de un desequilibrio en el balance energético de la tierra, causado por procesos naturales y antropogénicos (Camino *et al.*, 2011). Desde 1950 se han detectado cambios en el sistema climático que no tiene precedentes, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han aumentado por la actividad humana (uso de combustibles fósiles y la deforestación), el metano ha excedido el rango de concentraciones registradas en los últimos 800 años, la temperatura media global muestra un incremento de 0.85 en el periodo de 1880-2012, la capa superior del océano se ha calentado más de 0.1 °C durante el periodo de 1971-2010 y el nivel medio del mar ha tenido un aumento de 0.19 m en el periodo de 1901-2010 a nivel mundial y los glaciares y manto de hielo están perdiendo masa (Camino *et al.*, 2011), así mismo las concentraciones en la atmósfera de CO₂, N₂O y CH₄ son muy superiores que durante miles de años atrás (Pardos, 1999).

Existen estimaciones que predicen que en los próximos 200 a 500 años pueden producirse cambios superiores a los ocurridos en 10,000 años pasados, además de que los rangos y abundancia de algunas especies pueden verse desplazados de 500 a 1,000 km en dicho periodo (Perry, 1994).

La temperatura y la precipitación son factores para que una especie germine, crezca, florezca y fructifique, además delimitan la distribución de las especies, cuando una de estas excede el grado de tolerancia esta no puede llevar a cabo su ciclo biológico de manera adecuada (Gutiérrez y Trejo, 2014). Los efectos del cambio climático se verán reflejados sobre la fisiología, fenología, adaptación, distribución y abundancia de las especies (Hughes, 2000) o en su caso con la extinción de algunas especies (Thomas *et al.*, 2004).

2.7. Modelos de circulación general

Los modelos de circulación general (GCM) son utilizados para realizar estimaciones del cambio climático generado por el aumento de la concentración de gases en la atmósfera (Zorita y Storch, 1991). Estos modelos proporcionan proyecciones climáticas a grandes rasgos y constituyen una herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas (Calle y Calzado, 2013) y se cree que son el mejor instrumento para predecir el cambio climático (Zorita y Storch, 1991).

Estos modelos se basan en ecuaciones matemáticas que se resuelven utilizando una rejilla tridimensional sobre el globo terráqueo y han sido mejorados en los últimos años gracias a los desarrollos computacionales (Acevedo y Poveda, 2008).

2.8. Trayectorias de concentración representativas

Las trayectorias de concentración representativas (RCP's) brindan escenarios los cuales se ven afectados por la presencia de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

En el RCP 4.5 el forzamiento radiativo será de $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ y las emisiones tendrán valores máximos alrededor del año 2040 para después disminuir, mientras que en el RCP 8.5 el forzamiento radiativo considerado es de $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$ con emisiones que aumentarían durante el próximo siglo (Moss *et al.*, 2010).

2.9. Algoritmo y software aplicado en la modelación

2.9.1. Maxent

Maxent emplea el principio de máxima entropía para relacionar los datos de presencia con las variables ambientales para estimar el nicho de una especie y su distribución geográfica potencial (Phillips *et al.*, 2006). Los modelos de máxima entropía se han introducido recientemente y se ha convertido en una herramienta popular para modelar la distribución potencial de especies y pronosticar distribuciones futuras bajo el cambio climático (Phillips *et al.*, 2006). Maxent se ha convertido popular porque es fácil de usar y logra una alta precisión predictiva con datos escasos, muestreados de manera irregular y errores de ubicación menores (Elith *et al.*, 2006; Phillips y Dudík, 2008).

2.9.2. Software R

El proyecto de software R fue iniciado por Robert Gentleman y Ross Ihaka. R es un entorno de software de código abierto para gráficos y computación estadística, se compila y se ejecuta en Windows, Mac OS X y numerosas plataformas, se distribuye en formato binario para facilitar la instalación. R se ha convertido en la lengua franca para los cálculos estadísticos en muchas disciplinas del mundo académico y diversas industrias. Tiene un sistema de repositorio mundial, la completa Red de archivos R (CRAN) para paquetes complementarios aportados por el usuario para complementar la distribución base. En total, R tiene actualmente funcionalidad para abordar una enorme variedad de problemas y todavía tiene espacio para crecer. R está diseñado en torno a su lenguaje de scripting central, pero también permite la integración con código compilado escrito en C, C ++, Fortran, Java, etc., para tareas computacionalmente intensivas o para aprovechar las herramientas proporcionadas para otros lenguajes (Verzani, 2012).

2.10. Estudios sobre distribución de especies

En un estudio realizado a nivel nacional por Sánchez et al. (2015) estimaron y mapearon el nicho climático para *Pinus Leiophylla* Schl. & Cham., para los climas del período 1961- 1990 y del futuro (2030, 2060 y 2090) utilizando la técnica de árboles de clasificación Random Forests, con datos del inventario forestal de México y el inventario forestal de Estados Unidos. El modelo utilizó seis variables de predicción (precipitación de verano, precipitación de verano, precipitación de invierno, temperatura media anual/precipitación media anual, días sumados con temperaturas superiores a 5 °C entre la última helada de la primavera y la primera helada de otoño y precipitación media anual/días con temperaturas superiores a los 5 °C), dominadas por variables de precipitación. La proyección del nicho climático 1961-1990 en climas futuros, a partir de tres modelos de circulación general (CGCM3, HadCM3 y CM2.1) y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, sugieren que el área ocupada por el nicho disminuirá rápidamente durante el siglo: una disminución del 35 % en la década alrededor del 2030, del 50 % para 2060, y 76 % para 2090. La reducción más grave de hábitat se produce en los dos extremos latitudinales de la distribución de la especie: Montañas Chiricagua, Arizona, en Estados Unidos en el extremo norte y en el estado de

Oaxaca, México, en el extremo sur; no hay indicio alguno de la expansión del hábitat climático propicio hacia el norte.

Ávila et al. (2018) estudiando a *Pinus herrerae* Martínez, georreferenciaron 391 árboles, considerando ocho variables climáticas interpoladas (precipitación media anual, temperaturas mínima, media y máxima anual, evaporación media anual, humedad relativa anual, evapotranspiración media anual y precipitación pluvial media), además de nueve ambientales (textura, pendiente, exposición, área de radiación solar, rugosidad, altura, geología, edafología, vegetación e índice normalizado de vegetación). Utilizaron el software Maxent para categorizar de manera probabilística su distribución potencial. El área de estudio se ubicó al oeste de la Sierra de Quila, Jalisco, México. Para determinar las variables climáticas y ambientales más importantes que influyen en la distribución de la especie se utilizó la prueba de *Jackknife*. De acuerdo al área bajo la curva (AUC) del ROC, ambas interpolaciones en las curvas de entrenamiento y de prueba se situaron lo más juntas posible, lo que significó alcanzar un ajuste en el modelo utilizando las variables climáticas de 0.959 para los datos de entrenamiento y 0.958 para los datos de prueba; por otra parte, con la interpolación de los datos climáticos junto con las variables ambientales se obtuvieron los valores más altos para los datos de entrenamiento (0.973) y de prueba (0.971). Se concluye que la distribución potencial de *P. herrerae* se favorece cuando se desarrolla sobre un suelo Cambisol húmico, un intervalo altitudinal de 1 985 a 2 227 m; un promedio anual de precipitación de 882 mm y temperatura media anual de 18 °C.

Con los objetivos de modelar la distribución potencial actual de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* y proponer áreas para localizar los mejores individuos y establecer unidades productoras de germoplasma forestal (UPGF) en Michoacán y Oaxaca, Barrera et al. (2020) utilizaron algoritmos de Maxent, 2,451 registros de presencia obtenidos de registros propios, del sistema Biométrico Forestal, Global Biodiversity Information Facility y del Herbario Nacional MEXU y 19 variables predictoras. De a la cantidad total de registros de presencia el 75 % se utilizó para el entrenamiento y el 25 % en la validación del modelo. Los modelos obtenidos indicaron que ambas variedades tienen zonas similares de distribución potencial en parte del Eje Neo volcánico y la Sierra Madre del Sur. Las variables con mayor contribución al modelo para la variedad *pseudostrobus* fueron las relacionadas con la temperatura, y para la

variedad *apulcensis* temperatura y precipitación. Se evaluó la capacidad predictiva de diez modelos mediante pruebas de precisión de AUC (Area Under the Curve), ROC-estándar (Receiver Operating Characteristics) y ROC-parcial.

Manzanilla et al. (2018) estudiando a *Pinus montezumae* Lamb. (n = 381) y *P. pseudostrobus* (n = 452) en México, como variables predictoras utilizaron datos climáticos, topográficos y edáficos utilizando a Maxent como algoritmo de modelación. Estimaron parámetros de similaridad y equivalencia para conocer el traslape del nicho. Las variables con mayor contribución al modelo de *P. pseudostrobus* fueron las variables temperatura promedio anual (41.3%) y precipitación total anual (14.3%), mientras que el suelo (31.1%) y la altitud (29%) fueron las determinantes para el modelo de *P. montezumae*. Los modelos mostraron zonas similares de alta idoneidad en la Faja Volcánica Transmexicana y en la Sierra Madre Sur. Los modelos seleccionados obtuvieron valores ROC parcial de 1.312 para *P. montezumae*, mientras que para *P. pseudostrobus* el modelo obtuvo un valor de 1.381.

Reynoso et al. (2018) con el objetivo de modelar la distribución potencial de *P. pseudostrobus* y *Pinus oocarpa* en Chiapas, México, utilizaron 220 y 52 registros de presencia respectivamente obtenidos del GBIF, del Missouri Botanical Garden y del Herbario Nacional de México. Utilizaron 25 variables, 17 derivadas de los valores mensuales de temperatura y precipitación obtenidas de la plataforma WorldClim y ocho de tipo topográfico, climático y edafológico. El modelado se realizó con el software Maxent, la validación de los modelos se realizó con 28 % de los datos para cada taxón con las técnicas Crossvalidate y Bootstrap. El modelo que mejor se ajustó fue el logístico. Los valores AUC para los modelos fueron de 0.882 para *P. oocarpa* y 0.947 en *P. pseudostrobus*. Las variables que más influyeron en la presencia o ausencia de las especies fue la altitud con (84.5 %), Bio 2 (6.9 %) y Bio 14 (6.2 %) para *P. oocarpa* y *P. pseudostrobus* fue altitud con 97.3, pH (2.4 %) y edafología con (0.3 %).

Cruz et al. (2016) con el objetivo de evaluar la distribución potencial de 12 especies de Pinaceae en el estado de Michoacán en condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático, obtuvieron 200 registros de presencia para pinos y abetos los cuales fueron recolectados del herbario nacional. Las especies estudiadas con número de registro correspondiente son: *Abies guatemalensis* Rehd. (4), *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. &

Cham. (22), *Pinus douglasiana* Martínez (11), *Pinus hartwegii* Lindl. (5), *Pinus lawsonii* Roehl ex Gordon (15), *P. leiophylla* (48), *Pinus michoacana* Martínez (36), *P. montezumae* (15), *P. oocarpa* (4), *P. pseudostrobus* (18), *Pinus rzedowskii* Madrigal & M. Caball. (15) y *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. (7). Utilizaron 19 variables bioclimáticas para condiciones actuales y futuras, así como cationes solubles del suelo, conductividad eléctrica, materia orgánica y pH. El modelado se realizó con el software Maxent, 75 % de los datos de presencia de las especies se utilizó para el entrenamiento de los modelos y 25 % restante para su validación. Los mapas de salida se clasificaron en tres categorías de áreas para la distribución de las especies: no idónea, marginal e idónea. Los modelos muestran que habrá una disminución de -10.97 y -37.95 % áreas idóneas en los horizontes 2015-2039 y 2075-2099, respectivamente para *P. pseudostrobus*. Las variables que más aportaron al modelo para *P. pseudostrobus* fueron Bio 6, pH y la altitud.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Registros de presencia de la especie

Los registros de ocurrencias de *P. pseudostrobus* se obtuvieron de artículos científicos, Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), Red Mundial de Información sobre la Biodiversidad (REMIB) y Global Biodiversity Information Facility (GBIF).

Se realizó una depuración de los registros de presencia de la especie, eliminando registros duplicados, fuera del área de distribución de la especie (latitud, longitud y altitud) y aquellos que se ubicaban en áreas extrañas o no fueran precisos (igual o menor a tres dígitos) (Méndez-Encina *et al.*, 2021). En el programa estadístico R (R Core Team, 2019) se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) con el paquete FactoMineR (Lê *et al.*, 2008), utilizando los valores de las 15 variables bioclimáticas y altitud de cada registro de presencia, generando una elipse del 99%, los registros fuera de la elipse fueron eliminados. En R (R Core Team, 2019) se utilizó el paquete Sp-thin (Aiello-Lammens *et al.*, 2015) para eliminar la autocorrelación entre los registros, utilizando una distancia de 5 km entre cada registro.

3.2. Variables bioclimáticas y selección

Para este estudio se usaron variables bioclimáticas (Bios) en formato digital, que fueron remuestreadas a 5 km². Se utilizaron 15 variables climáticas de CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) del periodo 1979-2013 para predecir la distribución actual. Las variables bioclimáticas del periodo 2040-2060 de los modelos de circulación general, CCSM4 (Gent *et al.*, 2011), HADGEM2 (Bellouin *et al.*, 2011) y MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010) en dos RCP (4.5 y 8.5) para predecir la distribución futura (Karger *et al.*, 2017). Fueron descartadas Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 (Escobar *et al.*, 2014), ya que combinan información de temperatura y precipitación (Tabla 1).

La selección de las variables bioclimáticas se basó en: 1) la contribución relativa de la variable al perfil bioclimático de la especie, determinada a través de análisis de componente

principales (Méndez-Encina *et al.*, 2021) con el paquete FactoMineR de R (Lê *et al.*, 2008), previamente extrayendo el valor de las 15 variables bioclimáticas para cada registro de presencia, 2) variables no correlacionadas determinadas mediante un análisis de correlación paramétrica en R, (3) la distribución de frecuencia variable utilizando la regla de Sturges (Sturges, 1926) y (4) la capacidad predictiva de la variable, modelando previamente con las variables individual.

3.3. Área de calibración (M)

El área M que representa la parte del mundo a donde la especie es accesible por algún medio de introducción (Soberón y Peterson, 2005), se delimitó de acuerdo a los registros de presencia de la especie, después de finalizar el proceso de limpia. Los registros fueron proyectados en el programa ArcMap, donde se creó un área buffer de 100 km alrededor de cada registro, posteriormente se suavizó con la herramienta Smooth de ArcMap al 13 %.

3.4. Proceso de modelación

La modelación se realizó con ayuda del paquete kuenm (Cobos *et al.*, 2019), un paquete R que utiliza Maxent como algoritmo de modelación, en el cual se realiza los procesos de creación, calibración y evaluación.

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

| Variable | Descripción | PCA | Set 1 | Set 2 | Set 3 |
|----------|--|-----------|----------|----------|----------|
| Bio 1 | Temperatura media anual (°C) | 17.72 [2] | * | * | * |
| Bio 2 | Intervalo medio diurno (Media por mes [Temp. Máx - Temp. Min.]) (°C) | 10.11 [1] | | | |
| Bio 3 | Isotermalidad (Bio 2 / Bio 7)*(100) | 7.73 [1] | | | |
| Bio 4 | Temporalidad de la temperatura (desviación) (°C) | 10.86 [1] | * | * | * |
| Bio 5 | Temperatura máxima del mes más cálido (°C) | 12.16 [2] | * | * | * |
| Bio 6 | Temperatura mínima del mes más frío (°C) | 16.22 [2] | | | |

| | | | | | |
|--------|---|-----------|---|---|---|
| Bio 7 | Intervalo de temperatura anual (Bio 5 - Bio 6) (°C) | 13.51 [1] | * | * | * |
| Bio 10 | Temperatura media del 1/4 anual más cálido (°C) | 10.64 [2] | | | |
| Bio 11 | Temperatura media del 1/4 anual más frío (°C) | 20.79 [2] | * | * | |
| Bio 12 | Precipitación anual (mm) | 13.51 [1] | | | |
| Bio 13 | Precipitación del mes más húmedo (mm) | 11.59 [1] | * | | |
| Bio 14 | Precipitación del mes más seco (mm) | 4.69 [2] | | | |
| Bio 15 | Temporalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación) | 6.18 [2] | | | |
| Bio 16 | Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm) | 11.27 [1] | | | |
| Bio 17 | Precipitación de 1/4 anual más seco (mm) | 4.82 [2] | | | |

*indica la distribución de la variable en set. [entre corchetes]=componente principal.

Del conjunto de variables seleccionadas, se crearon tres grupos de variables: Set 1 (Bio 1, 4, 5, 7, 11 y 13), Set 2 (Bio 1, 4, 5, 7 y 11) y Set 3 (Bio 1, 4, 5 y 11). Se usaron 16 configuraciones de multiplicador de regularización (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10) y 7 tipos de respuestas: l, q, p, lq, lp, qp, lqp (lineales= l, cuadráticas= q, producto= p). Los registros de presencia de la especie se dividieron los datos de ocurrencia en tres subconjuntos: calibración (75 %), evaluación (25 %) y entrenamiento.

3.5. Selección del modelo

Para la selección del modelo se consideró el estadístico ROC parcial (Curva Operada por el Receptor) (Peterson *et al.*, 2008), tasa de omisión (5 %), el valor más bajo del Criterio de Información de Akaike (AICc) (Warren y Seifert, 2011), las curvas de respuesta de la especie a los gradientes ambientales, la significancia estadística del modelo, valor p y tres tipos de salidas del modelo: extrapolación (E), extrapolación clamping (EC) y sin extrapolación (NE), eligiendo la que mejor respuesta de variables obtuviera.

3.6. Estratificación de los mapas de idoneidad

Los mapas de idoneidad actual y futura de *P. pseudostrobis* se estratificaron en tres estratos: idoneidad baja (<0.33), idoneidad media (0.33-0.66) e idoneidad alta (>0.66) con ayuda de

la herramienta reclasificar de ArcMap, considerando el valor de 0 como el de menor idoneidad y el valor 1 como el de mayor idoneidad.

3.7. Transferencia del modelo (MOP)

Se evaluó el riesgo de extrapolación del modelo utilizando la paridad orientada a la movilidad (MOP) que identifica zonas de extrapolación estricta y calcula la similaridad entre el área de calibración y el área de proyección (Owens *et al.*,2013).

3.8. Áreas idóneas para el futuro

El mapa de idoneidad actual y futura del modelo seleccionado para *P. pseudostrobus* se reclasificó en 0 y 1 con ayuda de la herramienta reclasificar de ArcMap, el valor de 0 va desde la idoneidad mínima hasta el límite inferior del segundo estrato obtenido en la sección anterior (0-0.33), mientras que el valor de 1, correspondió al resto de la idoneidad (0.33-1).

Una vez concluida la reclasificación, se realizó el álgebra de rasters en ArcMap con la finalidad de evaluar la pérdida o ganancia actual y futura de áreas, obteniendo las siguientes áreas: Nuevas áreas idóneas (NAI) donde la especie ocurre potencialmente en el futuro, pero no son aptas para la ocurrencia en condiciones actuales, Áreas de alto impacto (AAI) donde la especie ocurre potencialmente en la actualidad, pero no es apta en el futuro y Áreas de bajo impacto (ABI) donde la especie ocurre potencialmente en la actualidad y en el futuro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelo de idoneidad

Se colectaron 3,289 registros de la especie, una vez concluida la limpieza de los registros quedaron 999 registros. Stockwell y Peterson (2002) argumentan que la modelación de cualquier especie depende de la cantidad y calidad de los datos, además sugieren que para obtener una predicción robusta se deben utilizar un mínimo de 50 registros. Aunque existen casos (Cruz *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2017) en los que se ha modelado para la misma especie con menor cantidad de registros (18) y (48). En el presente estudio se utilizaron 999 registros de *P. pseudostrobis* obteniendo una buena predicción de acuerdo con el valor ROC parcial obtenido (1.507). Estudiando a la misma especie Manzanilla *et al.* (2018) y Barrera *et al.* (2020) obtuvieron buenas predicciones de acuerdo con el valor ROC parcial obtenido (1.381) y (1.385), utilizando 109 y 494 registros, por su parte Aceves *et al.* (2017) y Reynoso *et al.* (2018) obtuvieron buenas predicciones de acuerdo con el valor AUC obtenido (0.950) y (0.947), utilizando 473 y 52 registros.

Como se observa en la Tabla 2 se generaron 366 modelos candidatos, todos estadísticamente significativos, el modelo seleccionado tiene una respuesta cuadrática (q), utilizando en Set 1 de variables compuesto por Bio 1 (Temperatura media anual °C), Bio 4 (Temporalidad de la temperatura), Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido °C), Bio 7 (Intervalo de temperatura anual), Bio 11 (Temperatura media del 1/4 anual más frío °C) y Bio 13 (Precipitación del mes más húmedo (mm)), con una contribución de 53.9, 11.3, 32, 0.1, 1.3 y 1.5% respectivamente. El tipo de respuesta que mostró mejores predicciones fue la extrapolación (E).

El modelo generado para predecir la distribución de *P. pseudostrobis* obtuvo un valor ROC parcial de 1.507 (Tabla 2), que de acuerdo con Peterson *et al.* (2007) los valores mayores a 1 indican que las predicciones se deben al modelo y no al azar, lo que nos indica que el modelo

seleccionado tiene una buena predicción. Manzanilla et al. (2018) y Barrera et al. (2020) estudiando la misma especie reportaron un valor ROC parcial de 1.381 y 1.385 respectivamente. Las variaciones en los ajustes de los modelos se deben a: (1) la cantidad de registros utilizados y limpieza, (2) la metodología empleada para la selección de variables y variables utilizadas, puesto que además de variables bioclimáticas Manzanilla et al. (2018) y Barrera et al. (2020) agregan variables topográficas como variables predictoras, difiriendo además en el origen de las variables utilizadas por ellos que son de la Unidad de Información para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales mientras que las utilizadas en el presente estudio son de CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas) y (3) algoritmo empleado para la modelación. Por otra parte, autores han reportado valores ROC parciales superiores a 1 trabajando con especies diferentes como Martínez et al. (2020) quienes obtuvieron un valor ROC parcial de 1.94 para *Pinus greggii* Englem. modelando para dos provincias fisiográficas de México, así mismo Méndez-Encina et al. (2021) obtuvieron valores ROC parciales de 1.24, 1.49 y 1.35 para *P. leiophylla*, *P. teocote* y *Pinus devoniana* Lindley, respectivamente.

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

| Criterio/especie | <i>Pinus pseudostrobus</i> |
|-------------------------|----------------------------|
| | Generación de modelos |
| TmC | 336 |
| mES (p≤0.05) | 336 |
| mTO | 16 |
| mAIC | 1 |
| n de mES y mTO | 16 |
| n de mES y mAIC | 1 |
| n de mES, mTO y mAIC | 1 |
| Modelo seleccionado | M_10_F_q (Set1) |
| | Estadísticos de ajuste |
| Media AUC ratio | 1.507 |
| ROC Parcial | 0 |
| Tasa de omisión > 0.05% | 0.048 |

| | |
|-----------------|----------|
| AICc | 19815.16 |
| delta AICc | 0 |
| Núm. parámetros | 5 |

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 Akaike.

En el presente estudio, se evaluaron tres grupos de variables (Sets), siendo el constituido por las Bio 1, Bio 4, Bio 5, Bio 7, Bio 11 y Bio 13 (53.9, 11.3, 32, 0.1, 1.3 y 1.5% de contribución respectivamente) el que mejor explica la distribución de *P. pseudostrobus*. Por su parte Manzanilla et al. (2018) obtienen como resultado que las variables Bio 1, Suelo y Bio 12 (43.1, 18.3 y 14.3 % de contribución) son las que explican mejor la distribución de *P. pseudostrobus* coincidiendo con nuestros resultados al obtener a Bio 1 como la variable que más contribuye al modelo. Barrera et al. (2018) reportan para *P. pseudostrobus* las variables Bio 4, 10 y 2 (48.1, 29.3, y 6.6 % de contribución) y Aceves et al. (2017) reportan las variables Bio 5, Bio 10 y Bio 12 (33.0, 20.7, y 18.0 % de contribución) como las que mejor explican la distribución la especie, aunque ambos reportan 1 variable similar a las nuestras, difieren en el orden de contribución reportando a Bio 4 y Bio 5 como las de mayor contribución, mientras que en el presente estudio la variable que más contribuye es Bio 1. Otros autores como Cruz et al. (2016) trabajando con la misma especie difieren en totalidad a nuestros resultados obtenidos, reportando las variables Bio 6, Altitud y el pH (92.4, 1.5 y 6.0 %) como las variables que explican la distribución de la especie.

4.2. Áreas de idoneidad para *Pinus pseudostrobus* Lindl

Los estratos de idoneidad para *P. pseudostrobus* quedaron establecidos de la siguiente manera: bajo (<0.33), medio (0.33-0.66) y alto (>0.66) (Figura 1).

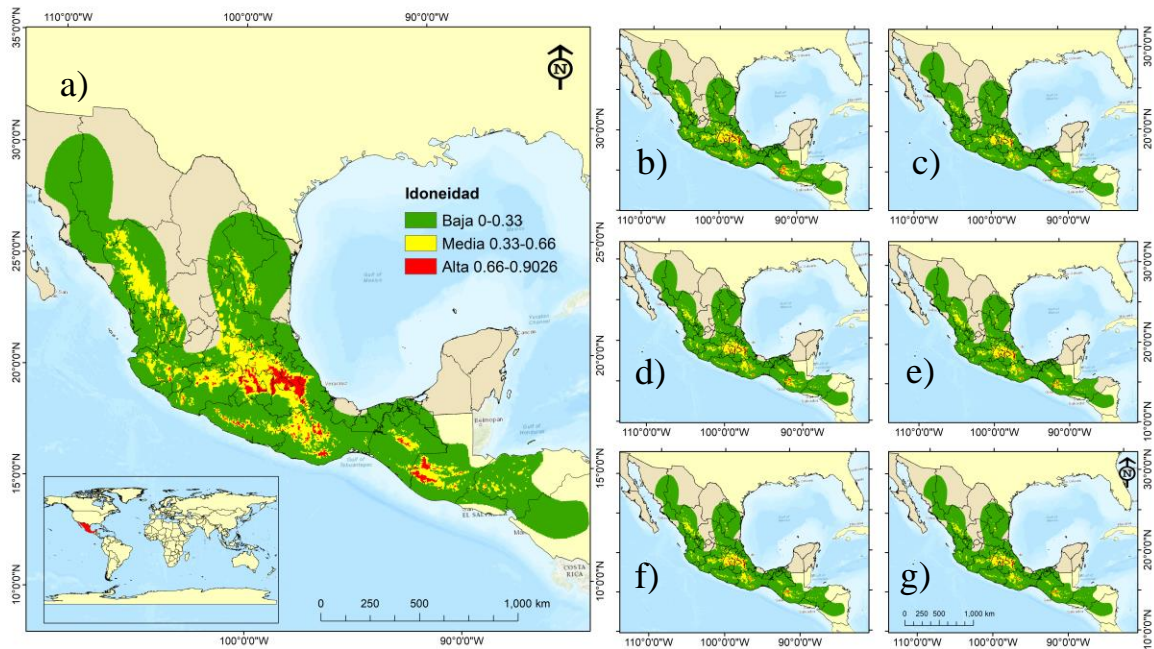


Figura 1. Mapa de idoneidad actual (a) para *Pinus pseudostrobus* Lindl, estratificado en baja, media y alta, y distribución potencial de la especie, usando proyecciones climáticas al 2050 de tres modelos de circulación general: CCSM4 (b y c), HADGENM (d y e) y MIROC5 (f y g), en dos trayectorias de concentración 4.5 (b - f) y 8.5 (c - g).

La superficie idónea actual que se estimó para *P. pseudostrobus* en México y países aledaños fue como sigue: idoneidad alta con una superficie de 33,701.17 km², idoneidad media con una superficie de 203,694.50 km² e idoneidad baja con una superficie de 1,082,678.08 km², siendo la idoneidad baja la más predominante contribuyendo con 82.02 % de área de calibración (M), mientras que el área idónea media y alta contribuyen con 15.43 y 2.55 % respectivamente del área de calibración (M). Las áreas idóneas altas se encuentran en los estados de Puebla (7027.57 km²), Oaxaca (4196.33 km²) y México (5434.01 km²), contribuyendo en su conjunto con 49.41 % del total de la superficie se idoneidad alta (Tabla 3).

Varios autores han estimado áreas de idoneidad para *P. pseudostrobus*, por ejemplo: Aceves et al. (2017) reportan una superficie idónea alta (>0.7) de 11,594.80 km² para *P. pseudostrobus* en México, por su parte Reynoso et al. (2018) reportan un área de 478,493 ha

para el establecimiento de áreas productora de germoplasma forestal en el estado de Chiapas, finalmente Barrera et al. (2018) reportan un área de alta idoneidad para *P. pseudostrobus* de 258,900 ha en Michoacán y Oaxaca. Como ya se mencionó anteriormente las variaciones en las superficies estimadas de idoneidad entre los estudios anteriormente mencionados se deben en la metodología aplicada durante el proceso de modelación. Por lo cual se debería optar por homogenizar los métodos para la modelación de nichos ecológicos.

Tabla 3. Superficie de idoneidad actual para *Pinus pseudostrabus* Lindl, estratificada (baja, media y alta) para cada estado de México o país aledaño.

| Estado | Superficie por idoneidad (km ²) | | | Superficie total | Porcentaje de la idoneidad climática | | | |
|----------------------|---|----------|---------|------------------|--------------------------------------|-------|------|---------|
| | Baja | Media | Alta | | Baja | Media | Alta | Total % |
| Campeche | 3891.09 | 0.00 | 0.00 | 3891.09 | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.29 |
| Chiapas | 66628.75 | 5880.60 | 772.51 | 73281.85 | 5.05 | 0.45 | 0.06 | 5.55 |
| Chihuahua | 78172.43 | 2104.14 | 0.00 | 80276.57 | 5.92 | 0.16 | 0.00 | 6.08 |
| Ciudad de México | 0.00 | 945.39 | 548.02 | 1493.41 | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.11 |
| Coahuila de Zaragoza | 22096.69 | 1211.92 | 0.00 | 23308.61 | 1.67 | 0.09 | 0.00 | 1.77 |
| Colima | 5364.83 | 181.94 | 6.73 | 5553.50 | 0.41 | 0.01 | 0.00 | 0.42 |
| Durango | 62141.47 | 31169.76 | 0.00 | 93311.23 | 4.71 | 2.36 | 0.00 | 7.07 |
| El Salvador | 14194.55 | 181.60 | 0.00 | 14376.15 | 1.08 | 0.01 | 0.00 | 1.09 |
| Guanajuato | 14900.77 | 12111.44 | 24.74 | 27036.96 | 1.13 | 0.92 | 0.00 | 2.05 |
| Guatemala | 57642.62 | 14515.77 | 4874.44 | 77032.83 | 4.37 | 1.10 | 0.37 | 5.84 |
| Guerrero | 56169.54 | 5970.38 | 968.42 | 63108.35 | 4.26 | 0.45 | 0.07 | 4.78 |
| Hidalgo | 6169.49 | 11955.81 | 2680.57 | 20805.86 | 0.47 | 0.91 | 0.20 | 1.58 |
| Honduras | 66687.64 | 4274.53 | 105.73 | 71067.90 | 5.05 | 0.32 | 0.01 | 5.38 |
| Jalisco | 54158.28 | 11750.81 | 466.26 | 66375.36 | 4.10 | 0.89 | 0.04 | 5.03 |
| México | 4618.03 | 12285.55 | 5434.01 | 22337.59 | 0.35 | 0.93 | 0.41 | 1.69 |
| Michoacán de Ocampo | 40732.00 | 16674.67 | 1148.22 | 58554.89 | 3.09 | 1.26 | 0.09 | 4.44 |
| Morelos | 4209.97 | 431.33 | 233.75 | 4875.06 | 0.32 | 0.03 | 0.02 | 0.37 |
| Nayarit | 25250.39 | 2019.56 | 0.00 | 27269.95 | 1.91 | 0.15 | 0.00 | 2.07 |
| Nicaragua | 56494.28 | 0.00 | 0.00 | 56494.28 | 4.28 | 0.00 | 0.00 | 4.28 |
| Nuevo León | 54573.14 | 5945.87 | 28.19 | 60547.20 | 4.13 | 0.45 | 0.00 | 4.59 |
| Oaxaca | 66136.98 | 22127.79 | 4196.34 | 92461.11 | 5.01 | 1.68 | 0.32 | 7.00 |
| Puebla | 16185.62 | 11082.44 | 7027.57 | 34295.63 | 1.23 | 0.84 | 0.53 | 2.60 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| Querétaro | 3712.93 | 7715.80 | 255.16 | 11683.90 | 0.28 | 0.58 | 0.02 | 0.89 |
| San Luis Potosí | 44901.78 | 8634.72 | 0.00 | 53536.50 | 3.40 | 0.65 | 0.00 | 4.06 |
| Sinaloa | 43054.39 | 429.80 | 0.00 | 43484.19 | 3.26 | 0.03 | 0.00 | 3.29 |
| Sonora | 52284.44 | 0.00 | 0.00 | 52284.44 | 3.96 | 0.00 | 0.00 | 3.96 |
| Tabasco | 23801.44 | 0.00 | 0.00 | 23801.44 | 1.80 | 0.00 | 0.00 | 1.80 |
| Tamaulipas | 59549.26 | 2794.01 | 37.85 | 62381.12 | 4.51 | 0.21 | 0.00 | 4.73 |
| Texas | 5490.20 | 0.00 | 0.00 | 5490.20 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.42 |
| Tlaxcala | 0.00 | 1113.41 | 2880.83 | 3994.25 | 0.00 | 0.08 | 0.22 | 0.30 |
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 54592.59 | 2839.79 | 2011.83 | 59444.21 | 4.14 | 0.22 | 0.15 | 4.50 |
| Zacatecas | 18872.49 | 7345.66 | 0.00 | 26218.15 | 1.43 | 0.56 | 0.00 | 1.99 |
| Superficie total | 1082678.08 | 203694.51 | 33701.17 | 1320073.76 | 82.02 | 15.43 | 2.55 | 100.00 |

De acuerdo con el modelo de nicho utilizando las proyecciones climáticas de los tres modelos de circulación general se predicen reducciones de áreas idóneas (Tabla 4). Las áreas con alta idoneidad muestran una reducción que va desde 57.43 % (CCSM4-RCP 4.5) (Figura 1b) hasta 81.61 % (CCSM4-RCP 8.5) (Figura 1c) principalmente en los estados de Puebla, Oaxaca, México y Tlaxcala, las áreas de idoneidad media también muestran reducciones que van desde 30.71 % (CCSM4-RCP 4.5) (Figura 1b) hasta 57.25 % (CCSM4-RCP 8.5) (Figura 1c) principalmente en los estados de Jalisco, Michoacán, Oaxaca y en el país de Guatemala, mientras que las áreas de idoneidad baja podrían aumentar desde 7.98 % (CCSM4-RCP 4.5) (Figura 1b) hasta 13.72 % (CCSM4-RCP 8.5) (Figura 1c) principalmente en Michoacán, Jalisco, Querétaro y Hidalgo.

Tabla 4. Tasa de cambio porcentual de la superficie de idoneidad actual con respecto a las estimaciones para el año 2050 para *Pinus pseudostrubus* Lindl, utilizando el modelo de nicho con las proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general.

| Idoneidad/Superficie (km ²) | | Idoneidad baja (<0.33) | Idoneidad media (0.33-0.66) | Idoneidad alta (>0.66) | Total |
|---|---------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------|
| Modelo | Actual | 1082678.08 | 203694.51 | 33701.17 | 1320073.76 |
| | RCP 4.5 | 1169072.43 | 141149.71 | 14345.24 | 1324567.37 |
| | % | 7.98 | -30.71 | -57.43 | |
| GCM: CCSM4 | RCP 8.5 | 1231208.12 | 87085.74 | 6196.26 | 1324490.12 |
| | % | 13.72 | -57.25 | -81.61 | |
| | RCP 4.5 | 1202847.17 | 112216.78 | 9464.76 | 1324528.71 |
| GCM: HADGENM | % | 11.10 | -44.91 | -71.92 | |
| | RCP 8.5 | 1195101.50 | 120312.84 | 9161.72 | 1324576.05 |
| | % | 10.38 | -40.93 | -72.81 | |
| GCM:MIROC5 | RCP 4.5 | 1197989.78 | 117873.40 | 8687.45 | 1324550.64 |
| | % | 10.65 | -42.13 | -74.22 | |
| | RCP 8.5 | 1219724.12 | 97913.40 | 6815.66 | 1324453.17 |
| | % | 12.66 | -51.93 | -79.78 | |

GCM= Modelo de circulación general

Actualmente existen pocos estudios realizados sobre la modelación de nicho para *P. pseudostrubus* hacia el futuro y muchos de ellos son a escala regional. No obstante, el estudio realizado por Cruz et al. (2016) aunque fue realizado a escala regional y con una metodología

diferente para la selección de variables predictoras, la limpieza de registros, la evaluación del modelo y el algoritmo para generar el modelo de nicho ecológico de *P. pseudostrobus*, reportan una tasa de cambio en las áreas de idoneidad de -10.9 % para el horizonte cercano y -37.95 % para el horizonte lejano respecto a su línea base (1960-2000).

4.3. Nuevas áreas idóneas y áreas de alto y bajo impacto

De acuerdo a la modelación de *P. pseudostrobus*, se observa que para México no existen nuevas áreas idóneas en ambos RCP's (Figura 2a y Figura 3a) (Tabla 5 y 6), por otra parte, las áreas de alto impacto cuentan con una extensión de 112,488.57 km² (RCP 4.5) y 140,758.84 km² (RCP 8.5) principalmente en los estados de Durango, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y Oaxaca, las áreas de bajo impacto cuentan con una extensión de 140,947.66 km² (RCP 4.5) y 112,938.77 km² (RCP 8.5) principalmente en los estados de Durango, Hidalgo, México, Oaxaca, Puebla y el país de Guatemala (Figura 2a y Figura 3a) (Tabla 5 y 6).

Sin embargo, a nivel mundial en ambos RCP's se presentan nuevas áreas idóneas (NAI) principalmente en el sur de Alaska (Figura 2b y Figura 3b) y el norte de Islandia (Figura 2c y Figura 3c), con una superficie de 236,053.45 km² (RCP 4.5) y 193,061.73 km² (RCP8.5).

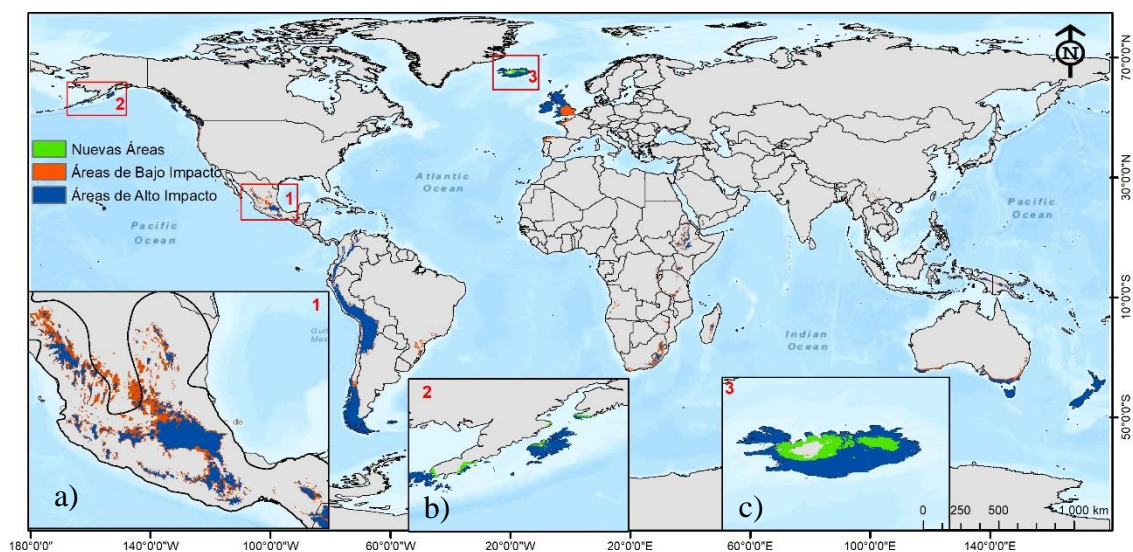


Figura 2. Clasificación de áreas de idoneidad estimadas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 4.5.

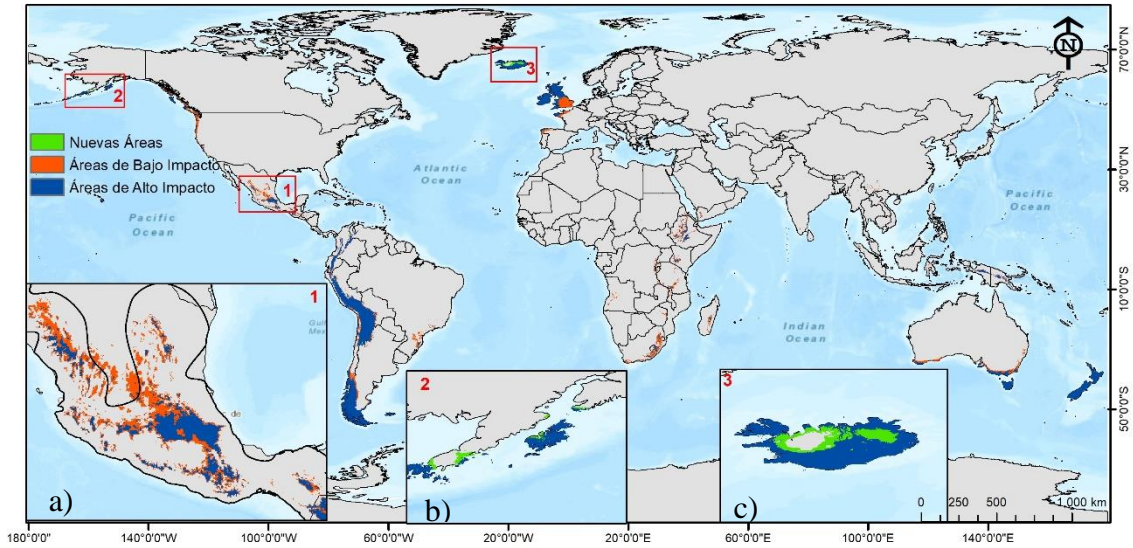


Figura 3. Clasificación de áreas de idoneidad estimas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 8.5.

Tabla 5. Idoneidad climática de *Pinus pseudostrobus* Lindl al 2050, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en el área de calibración (M).

| Estado | RCP 45 | | RCP 85 | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Áreas de Alto Impacto | Áreas de Bajo Impacto | Áreas de Alto Impacto | Áreas de Bajo Impacto |
| Campeche | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Chiapas | 2649.46 | 3902.63 | 3235.19 | 3331.78 |
| Chihuahua | 2066.73 | 25.79 | 2070.57 | 22.48 |
| Ciudad de México | 0.00 | 1493.41 | 640.24 | 853.17 |
| Coahuila de Zaragoza | 737.23 | 428.05 | 804.96 | 366.78 |
| Colima | 71.40 | 125.41 | 108.74 | 77.47 |
| Durango | 15494.93 | 15211.01 | 20441.89 | 10269.21 |
| El Salvador | 142.60 | 40.16 | 162.72 | 16.05 |
| Guanajuato | 9256.70 | 2764.18 | 10812.85 | 1296.68 |
| Guatemala | 5380.26 | 13853.30 | 7174.42 | 11959.01 |
| Guerrero | 2914.77 | 3969.20 | 3412.09 | 3461.45 |

| | | | | | |
|---------------------------------|---------|----------|---------------------------------|----------|----------|
| Hidalgo | 3307.95 | 11221.60 | Hidalgo | 5582.95 | 8999.26 |
| Honduras | 2511.19 | 1862.15 | Honduras | 2924.64 | 1420.36 |
| Jalisco | 6434.11 | 5468.70 | Jalisco | 8151.01 | 3815.37 |
| México | 1034.92 | 16593.99 | México | 2270.50 | 15374.50 |
| Michoacán de Ocampo | 7198.05 | 10475.54 | Michoacán de Ocampo | 10053.83 | 7604.80 |
| Morelos | 135.94 | 478.48 | Morelos | 152.35 | 459.75 |
| Nayarit | 1280.55 | 667.01 | Nayarit | 1520.81 | 389.11 |
| Nicaragua | 0.00 | 0.00 | Nicaragua | 0.00 | 0.00 |
| Nuevo León | 3846.71 | 2008.71 | Nuevo León | 4308.78 | 1612.22 |
| Oaxaca | 8164.36 | 17934.85 | Oaxaca | 10778.36 | 15368.89 |
| Puebla | 4073.75 | 14013.01 | Puebla | 5387.64 | 12693.23 |
| Querétaro | 4752.62 | 3184.04 | Querétaro | 5831.92 | 2105.67 |
| San Luis Potosí | 7259.91 | 1316.36 | San Luis Potosí | 7838.68 | 735.01 |
| Sinaloa | 279.15 | 152.28 | Sinaloa | 353.72 | 92.28 |
| Sonora | 0.00 | 0.00 | Sonora | 0.00 | 0.00 |
| Tabasco | 0.00 | 0.00 | Tabasco | 0.00 | 0.00 |
| Tamaulipas | 1544.60 | 1262.97 | Tamaulipas | 1833.76 | 983.99 |
| Texas | 0.00 | 0.00 | Texas | 0.00 | 0.00 |
| Tlaxcala | 0.00 | 3994.25 | Tlaxcala | 121.78 | 3872.47 |
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 1061.30 | 3720.45 | Veracruz de Ignacio de la Llave | 1281.29 | 3517.90 |
| Zacatecas | 5036.12 | 2212.40 | Zacatecas | 6174.47 | 1115.93 |

Tabla 6. Idoneidad climática de *Pinus pseudostrobus* Lindl al 2050, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en México y países aledaños.

| Estado | RCP 45 | | Estado | RCP 85 | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Áreas de Alto Impacto | Áreas de Bajo Impacto | | Áreas de Alto Impacto | Áreas de Bajo Impacto |
| Aguascalientes | 921.08 | 260.18 | Aguascalientes | 1111.51 | 74.71 |
| Baja California | 63.94 | 394.33 | Baja California | 120.80 | 326.67 |
| Baja California Sur | 303.05 | 92.87 | Baja California Sur | 303.05 | 92.87 |
| Campeche | 0.00 | 0.00 | Campeche | 0.00 | 0.00 |

| | | | | | |
|---------------------------------|----------|----------|---------------------------------|----------|----------|
| Chiapas | 2649.45 | 3902.63 | Chiapas | 3235.19 | 3331.78 |
| Chihuahua | 2066.73 | 25.79 | Chihuahua | 2070.57 | 22.48 |
| Ciudad de México | 0.00 | 1493.41 | Ciudad de México | 640.24 | 853.17 |
| Coahuila de Zaragoza | 737.23 | 428.05 | Coahuila de Zaragoza | 804.96 | 366.79 |
| Colima | 71.40 | 125.41 | Colima | 108.74 | 77.47 |
| Durango | 15595.83 | 15211.02 | Durango | 20542.82 | 10269.22 |
| El Salvador | 143.54 | 40.16 | El Salvador | 163.66 | 16.05 |
| Guanajuato | 11394.70 | 3460.17 | Guanajuato | 13384.78 | 1582.03 |
| Guatemala | 5380.26 | 13853.29 | Guatemala | 7174.41 | 11959.01 |
| Guerrero | 2914.77 | 3969.20 | Guerrero | 3412.10 | 3461.45 |
| Hidalgo | 3307.95 | 11221.60 | Hidalgo | 5582.95 | 8999.26 |
| Honduras | 2632.63 | 1987.73 | Honduras | 3060.95 | 1531.08 |
| Jalisco | 8307.89 | 5565.49 | Jalisco | 10107.78 | 3838.03 |
| México | 1034.92 | 16593.99 | México | 2270.50 | 15374.50 |
| Michoacán de Ocampo | 7198.05 | 10475.53 | Michoacán de Ocampo | 10053.83 | 7604.80 |
| Morelos | 135.94 | 478.48 | Morelos | 152.35 | 459.75 |
| Nayarit | 1280.55 | 667.01 | Nayarit | 1520.81 | 389.11 |
| Nicaragua | 0.00 | 0.00 | Nicaragua | 0.00 | 0.00 |
| Nuevo León | 3846.72 | 2008.71 | Nuevo León | 4308.79 | 1612.22 |
| Oaxaca | 8164.36 | 17934.85 | Oaxaca | 10778.35 | 15368.89 |
| Puebla | 4073.75 | 14013.01 | Puebla | 5387.64 | 12693.23 |
| Querétaro | 4752.62 | 3184.04 | Querétaro | 5831.92 | 2105.67 |
| Quintana Roo | 0.00 | 0.00 | Quintana Roo | 0.00 | 0.00 |
| San Luis Potosí | 8569.68 | 1330.37 | San Luis Potosí | 9160.32 | 735.83 |
| Sinaloa | 279.15 | 152.28 | Sinaloa | 353.72 | 92.28 |
| Sonora | 0.00 | 0.00 | Sonora | 0.00 | 0.00 |
| Tabasco | 0.00 | 0.00 | Tabasco | 0.00 | 0.00 |
| Tamaulipas | 1544.60 | 1262.97 | Tamaulipas | 1833.76 | 983.99 |
| Texas | 0.00 | 0.00 | Texas | 0.00 | 0.00 |
| Tlaxcala | 0.00 | 3994.25 | Tlaxcala | 121.78 | 3872.47 |
| Veracruz de Ignacio de la Llave | 1061.30 | 3720.45 | Veracruz de Ignacio de la Llave | 1281.29 | 3517.90 |
| Yucatán | 0.00 | 0.00 | Yucatán | 0.00 | 0.00 |
| Zacatecas | 14056.47 | 3100.38 | Zacatecas | 15879.27 | 1326.07 |

A partir de la información obtenida de la modelación se observa que la relación entre idoneidad climática de *P. pseudostrobus* y altitud es positiva, la idoneidad más alta (0.88) ocurre alrededor de los 3000 msnm (Figura 4a), esto coincide con lo que reporta Vozzo (2002) en la descripción de la especie, quien menciona que *P. pseudostrobus* se distribuye en un rango altitudinal de los 1,600 a 3,250 msnm dentro de su rango de distribución (desde México hasta Guatemala). De acuerdo con la Figura 4b se observa que las áreas de bajo impacto estimadas tienen una mediana en altitud de 2,441 m, y por otra parte las áreas de alto impacto tienen una mediana en altitud de 2,048 m.

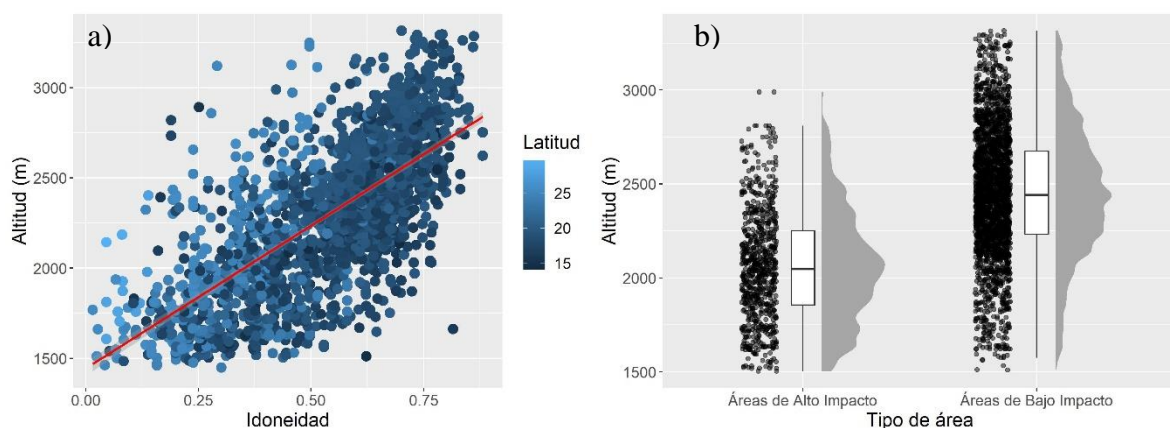


Figura 4. Relación de idoneidad actual con la altitud (a) y distribución altitudinal de los registros de presencia en áreas estimadas para *Pinus pseudostrobus* Lindl, al 2050 (b).

De acuerdo con las diferencias de los valores bioclimáticos actuales y futuros de los registros de presencia de la especie, se espera un margen de cambio en la temperatura media anual que va desde 1.3 hasta 1.9 °C (Figura 5a), para la temporalidad de la temperatura se espera un cambio de -7.7 hasta 12.6 °C (Figura 5b), para el rango anual de temperatura se espera un cambio de 0.8 hasta 1.81 °C (Figura 5d), para la temperatura media del cuarto anual más frío se espera un cambio de 1.2 hasta 2.1 °C (Figura 5e), para la precipitación del mes más húmedo se espera un cambio de -33.6 hasta 48.3 mm (Figura 5f) y para la temperatura máxima del mes más cálido se espera un cambio de 1.2 hasta 2.2 °C (Figura 5c). En el caso de Bio 1 y Bio 11 se espera que las áreas con menor cambio de temperatura sean las que se encuentran a latitudes menores (Figura 5a y 5e), mientras que para Bio 4 se espera que las áreas que presenten mayor cambio sean las que se encuentran a menor latitud (Figura 5b). Para el resto de Bios (5, 7 y 13) se espera que los cambios de temperatura y precipitación se

presenten de la misma manera tanto en latitudes altas como bajas (Figura 5c, 5d y 5f). Finalmente se observa una tendencia de menor cambio en temperatura y precipitación en altitudes mayores para Bio 11 y Bio 13 (Figura 5e y 5f), y una tendencia de cambios en temperatura mayores en altitudes más altas para Bio 4 (Figura 5b). El resto de Bios no muestran una tendencia clara.

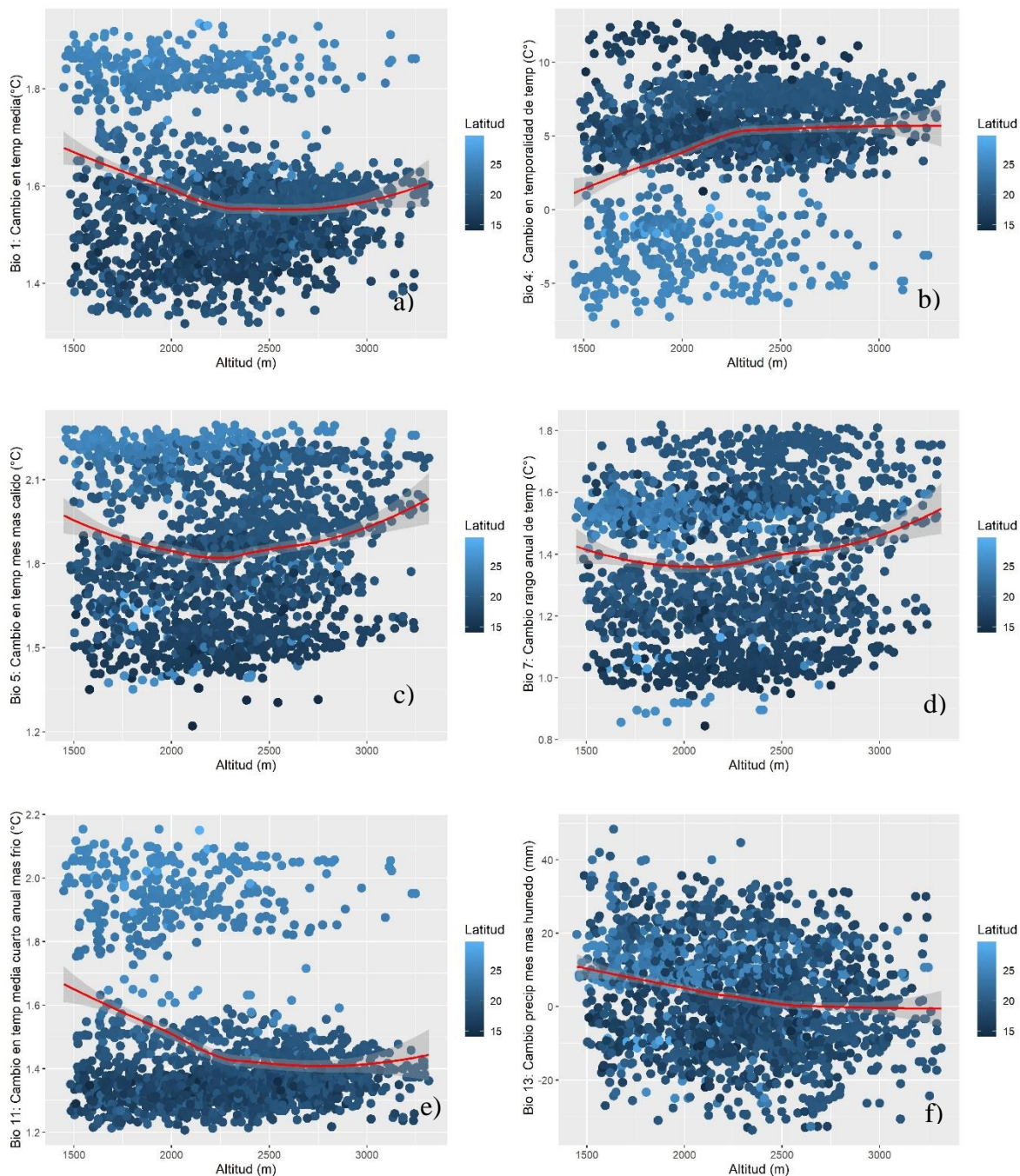


Figura 5. Diferencia de valores bioclimáticos actuales y futuros de las variables utilizadas para modelo de nicho ecológico de *Pinus pseudostrobus* Lindl (RCP 4.5).

4.4. Incertidumbre de las predicciones

La incertidumbre expresada como coeficiente de variación (CV) de las predicciones de idoneidad climática en el área de calibración (M) para el RCP 4.5 van desde 1.07 % en el estrato con idoneidad alta, hasta 9.44 % en el estrato con idoneidad baja y para el RCP 8.5 va desde 1.21 % en el estrato con idoneidad alta, hasta 11.40 % en el estrato con idoneidad baja. Así mismo en las latitudes más altas (60 °N hasta 90 °N), lugares que son inaccesibles para la especie se observan valores elevados de incertidumbre de hasta 195.5 % para el RCP al 4.5 y de 195.9 % para el RCP 8.5. (Figura 6a y 6b).

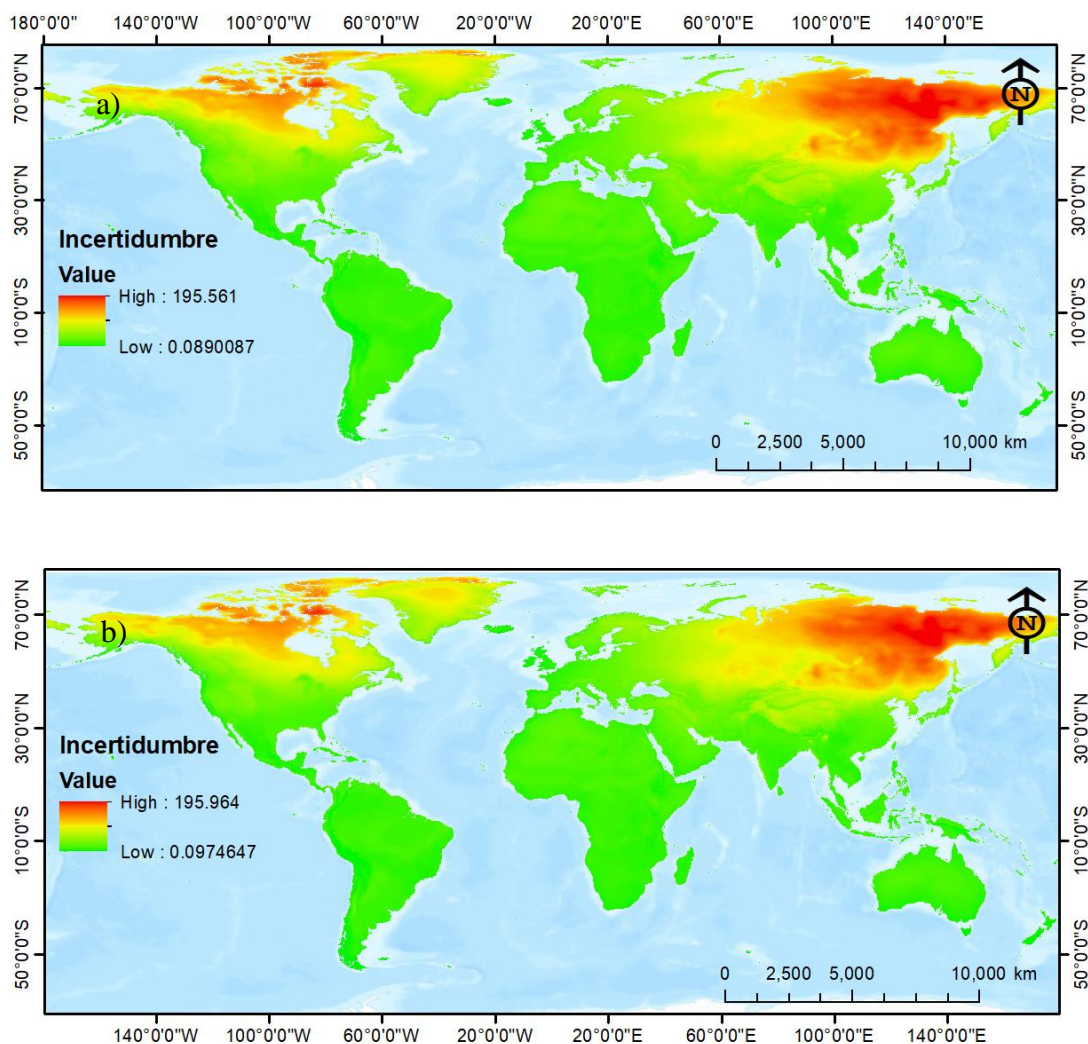


Figura 6. Incertidumbre promedio de las predicciones de idoneidad para *Pinus pseudostrobus* Lindl, promedio de tres modelos de circulación general (CCSM4, HADGENM y MIROC5) y dos RCP's 4.5 (a) y 8.5 (b).

4.5. Transferencia del modelo (MOP)

De acuerdo con Owens et al. (2013) la paridad orientada a la movilidad identifica áreas de extrapolación estricta y calcula la similitud ambiental entre el área de calibración (M) y proyección (G). La transferencia del modelo de idoneidad al 2050 en ambos RCP's para *P. pseudostrobus* muestra áreas con similitud ambiental. Sin embargo, la Paridad Orientada a la movilidad las excluye casi en su totalidad (Figura 7a y 7b).

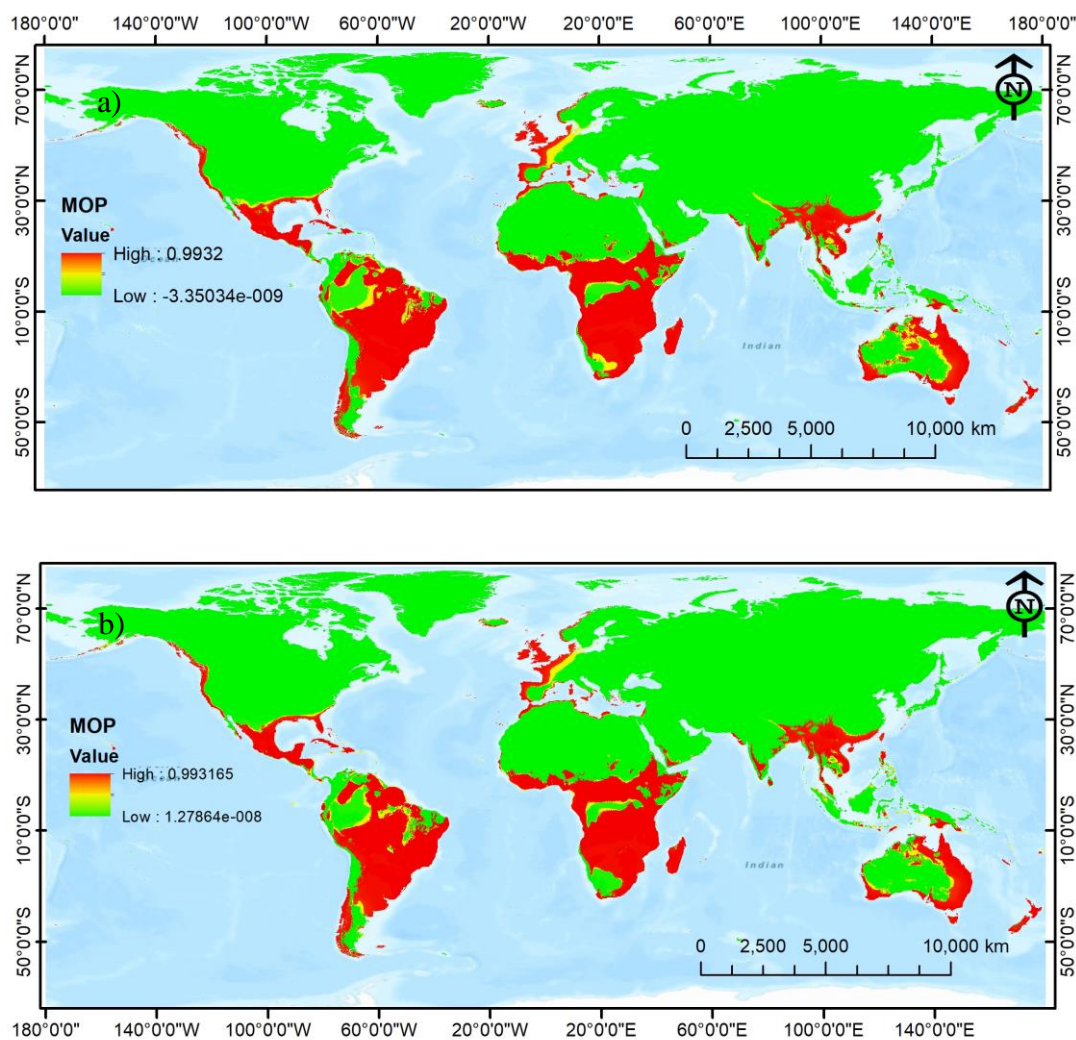


Figura 7. Paridad Orientada a la Movilidad para el modelo de nicho ecológico de *Pinus pseudostrobus* Lindl, utilizando el promedio de tres modelos de circulación general (CCSM4, HADGENM y MIROC5), en dos RCP's 4.5 (a) y 8.5 (b).

4.6. Perfil bioclimático de *Pinus pseudostrobus* Lindl

De acuerdo con las tres variables que más aportaron al modelo, se observa que para el 2050, en el área de calibración (M) para la Bio 1 se tendrá un incremento de 1.5 (RCP 4.5) y 1.9 °C (RCP 8.5), para la Bio 4 tendrá un aumento del 45.2 (RCP 4.5) y 59.7 °C (RCP 8.5) en la temporalidad de la temperatura y para la Bio 5 se tendrá un aumento de 1.8 (RCP 4.5) y 2.6 °C (RCP 8.5) (Tabla 7).

Los valores estadísticos de media, mediana y rango para las variables actuales que más aportaron al modelo son los siguientes respectivamente: Bio 1 (14.78, 14.72 y 17.34 °C), Bio 4 (21.29, 18.16 y 49.57 °C) y Bio 5 (23.32, 23.32 y 22.56 °C). Las variables bioclimáticas tendrán variaciones para el futuro dependiendo el RCP, los valores de media, mediana y rango para el RCP 4.5 serán los siguientes: Bio 1 (16.36, 16.3 y 17.67 °C), Bio 4 (21.74, 18.87 y 48.64 °C) y Bio 5(25.18, 25.20 y 23.03 °C), y para el RCP 8.5 serán los siguientes: Bio 1 (16.71, 16.67 y 17.67 °C), Bio 4 (21.89, 18.90 y 48.61 °C) y Bio 5(25.58, 25.6 y 22.63 °C).

En el espacio ambiental de *P. pseudostrobus* se registran las siguientes tolerancias climáticas: temperatura media que va desde 5.8 hasta 23.1 °C con una media de 14.8 °C y precipitación desde los 280 mm hasta los 4,050 mm con una media de 1,100 mm (Figura 8a) y una distribución latitudinal entre los 14 °N y 30 °N. La proyección de dos variables (Bio 1 y 12) en el espacio geográfico muestra el nicho realizado (NR) de *P. pseudostrobus* el cual es donde la especie está presente (Figura 8a y 8b), por otra parte, el nicho fundamental (NF) de la especie está constituido por las condiciones ambientales bióticas y abióticas bajo las cuales la especie puede subsistir y finalmente el nicho potencial (NP) es la intercepción del nicho fundamental con el espacio ecológico disponible (Figura 8a y 8b).

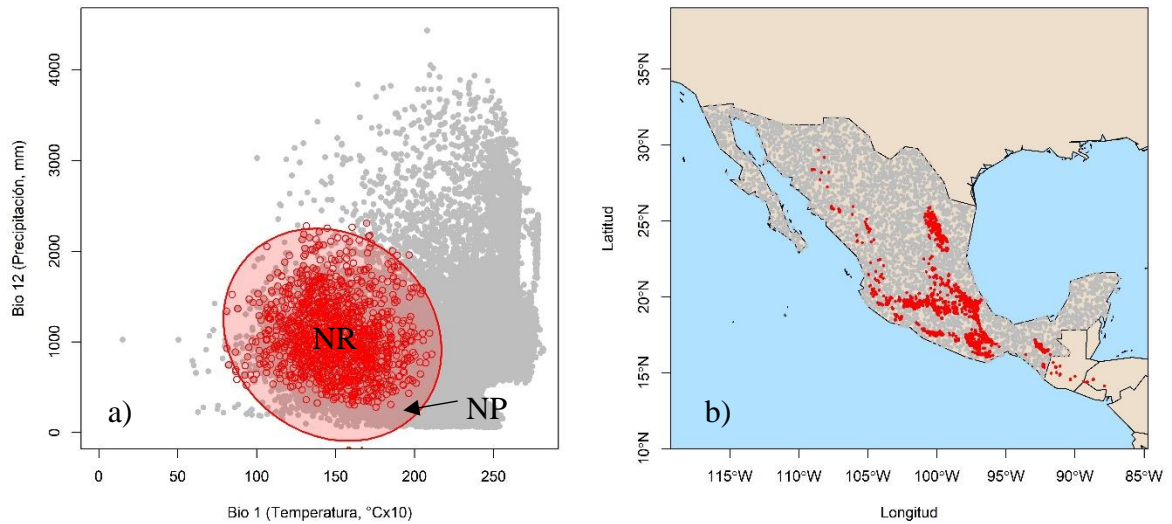


Figura 8. Espacio ambiental de *Pinus pseudostrobus* Lindl, elaborado con Bio 12 (Precipitación, mm), Bio 1 (Temperatura, °Cx10) y 1933 registros con elipse al 95 %. Los puntos rojos corresponden al área de distribución de la especie (NR) y los puntos grises corresponden a sitios con ambientes fuera del nicho de la especie y la intercepción del nicho fundamental con el espacio ecológico disponible (NP).

La temperatura (Bio 1) en las áreas de bajo impacto predichas para *P. pseudostrobus* tendrán un incremento de 1.58 °C (RCP 4.5) y 1.93 °C (RCP 8.5) (Tabla 8), por lo cual se espera que una vez que la temperatura supere esos límites la especie pueda verse afectada en sus procesos biológicos. Por lo cual se deberán realizar acciones para mitigar el incremento de la temperatura en los próximos años, puesto que para México no existen nuevas áreas idóneas en el futuro independientemente del RCP. Una de las principales acciones a realizar sería utilizar energías renovables y así reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Tabla 7. Contribución de variables bioclimáticas al modelo de *Pinus pseudostrabus* Lindl y perfil bioclimático actual y futuro para ambos RCP's.

| | | n | Media | IC (media) | 0.05 | 0.1 | 0.25 | Mediana | 0.75 | 0.9 | 0.95 | Rango | DE | CV | DME | RIQ |
|--------|----------|---|--------|---------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|-------|-------|
| Var. | Contrib. | Perfil Bioclimático Actual | | | | | | | | | | | | | | |
| Bio 1 | 53.9 | 1833 | 147.8 | ±1.07 | 108.7 | 118.5 | 132.2 | 147.2 | 164.1 | 177.4 | 186.5 | 173.4 | 23.6 | 0.2 | 23.2 | 31.8 |
| Bio 4 | 11.3 | 1833 | 2129.6 | ±43.73 | 1056.5 | 1146.9 | 1561.9 | 1816.9 | 2340.7 | 3778.5 | 4073.3 | 4957.5 | 954.8 | 0.5 | 469.9 | 778.8 |
| Bio 5 | 32.0 | 1833 | 233.2 | ±1.32 | 188.3 | 197.5 | 212.5 | 233.2 | 253.8 | 269.8 | 277.3 | 225.6 | 28.8 | 0.1 | 30.8 | 41.4 |
| Bio 7 | 0.1 | 1833 | 179.7 | ±1.47 | 134.4 | 138.1 | 158.1 | 176.1 | 198.5 | 224.8 | 240.3 | 189.1 | 32.1 | 0.2 | 30.1 | 40.4 |
| Bio 11 | 1.3 | 1833 | 113.7 | ±1.26 | 67.4 | 80.7 | 97.6 | 114.2 | 130.6 | 148.5 | 159.2 | 206.7 | 27.6 | 0.2 | 24.5 | 33.0 |
| Bio 13 | 1.5 | 1833 | 223.6 | ±3.86 | 96.0 | 114.0 | 163.0 | 223.0 | 282.0 | 323.0 | 358.0 | 739.0 | 84.2 | 0.4 | 87.5 | 119.0 |
| Var. | Contrib. | Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 4.5 | | | | | | | | | | | | | | |
| Bio 1 | 53.9 | 1833 | 163.6 | ±1.07 | 125.3 | 134.0 | 147.7 | 163.0 | 179.3 | 193.7 | 202.5 | 176.7 | 23.5 | 0.1 | 23.7 | 31.7 |
| Bio 4 | 11.3 | 1833 | 2174.8 | ±42.22 | 1109.1 | 1196.9 | 1633.0 | 1887.3 | 2378.0 | 3760.1 | 4042.7 | 4864.7 | 921.5 | 0.4 | 437.4 | 745.0 |
| Bio 5 | 32.0 | 1833 | 251.8 | ±1.35 | 205.3 | 215.0 | 230.3 | 252.0 | 273.0 | 289.7 | 297.1 | 230.3 | 29.5 | 0.1 | 31.6 | 42.7 |
| Bio 7 | 0.1 | 1833 | 193.6 | ±1.52 | 146.2 | 153.1 | 170.0 | 189.3 | 214.7 | 240.3 | 253.3 | 188.0 | 33.1 | 0.2 | 34.1 | 44.7 |
| Bio 11 | 1.3 | 1833 | 128.4 | ±1.21 | 84.7 | 97.0 | 112.3 | 129.0 | 144.3 | 163.0 | 173.0 | 199.0 | 26.5 | 0.2 | 23.7 | 32.0 |
| Bio 13 | 1.5 | 1833 | 226.9 | ±3.87 | 100.7 | 122.3 | 166.7 | 220.0 | 286.0 | 331.6 | 368.3 | 725.7 | 84.5 | 0.4 | 87.0 | 119.3 |
| Var. | Contrib. | Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 8.5 | | | | | | | | | | | | | | |
| Bio 1 | 53.9 | 1833 | 167.1 | ±1.08 | 128.7 | 137.4 | 151.7 | 166.7 | 183.0 | 197.3 | 206.0 | 176.7 | 23.5 | 0.1 | 23.7 | 31.3 |
| Bio 4 | 11.3 | 1833 | 2189.3 | ±41.93 | 1114.3 | 1209.9 | 1682.0 | 1890.3 | 2374.7 | 3765.3 | 4021.4 | 4861.0 | 915.5 | 0.4 | 413.2 | 692.7 |
| Bio 5 | 32.0 | 1833 | 255.8 | ±1.35 | 209.7 | 219.0 | 235.0 | 256.0 | 277.3 | 293.7 | 301.0 | 226.3 | 29.4 | 0.1 | 31.1 | 42.3 |
| Bio 7 | 0.1 | 1833 | 209.0 | ±1.52 | 161.7 | 167.3 | 185.7 | 205.7 | 230.3 | 253.7 | 268.5 | 193.0 | 33.1 | 0.2 | 34.1 | 44.7 |
| Bio 11 | 1.3 | 1833 | 132.3 | ±1.23 | 88.2 | 100.7 | 116.0 | 133.0 | 148.7 | 166.7 | 177.0 | 201.7 | 26.8 | 0.2 | 24.2 | 32.7 |
| Bio 13 | 1.5 | 1833 | 219.6 | ±3.71 | 99.5 | 116.3 | 161.0 | 213.3 | 276.7 | 319.0 | 353.5 | 678.3 | 81.1 | 0.4 | 85.5 | 115.7 |

Media IC = intervalo de confianza de la media, 0,05, 0,95 = cuantiles de la variable bioclimática, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación (%); DME = desviación absoluta media, IQR = rango intercuartílico

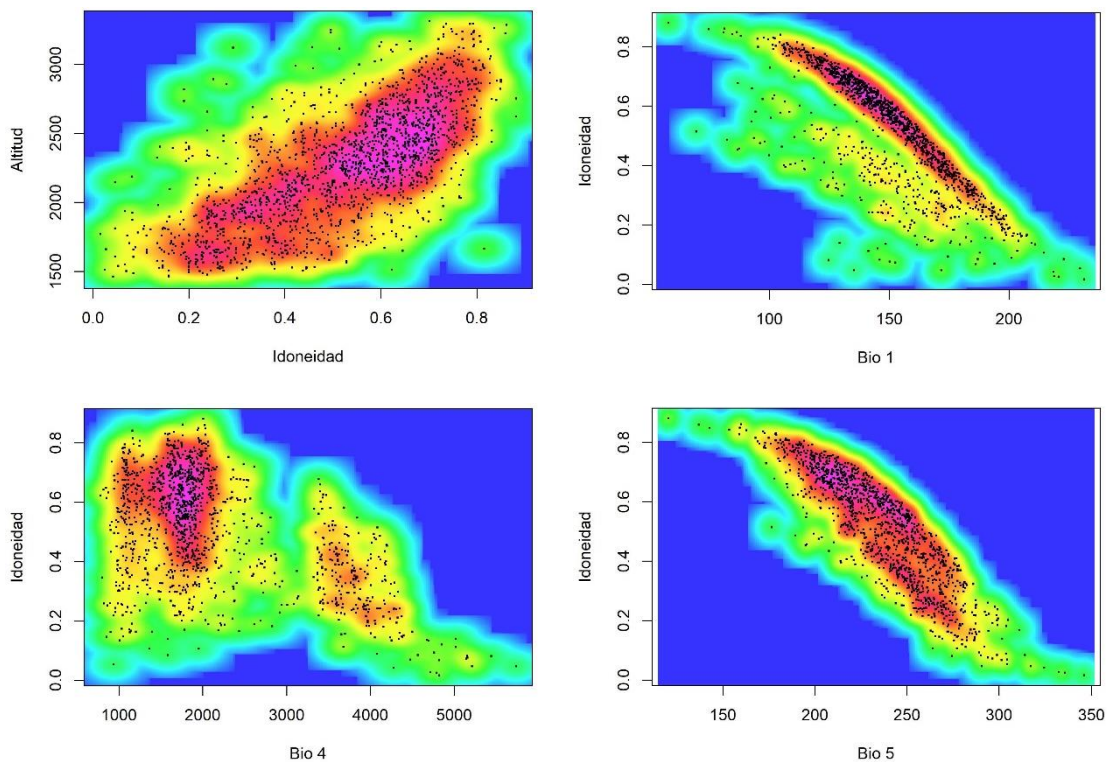
Tabla 8. Contribución y valores de las variables bioclimáticas en las Áreas de bajo impacto al 2050 para ambos RCP's.

| | | n | Media | IC (media) | 0.05 | 0.1 | 0.25 | Mediana | 0.75 | 0.9 | 0.95 | Rango | DE | CV | DME | RIQ |
|--|----------|------|--------|------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|-------|-------|
| Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 4.5, Áreas de Bajo Impacto | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Var. | Contrib. | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bio 1 | 53.9 | 1286 | 152.74 | ±0.94 | 122.33 | 129 | 142.67 | 154.33 | 165.67 | 173.5 | 176.9 | 111.7 | 17.1 | 0.1 | 16.8 | 23.0 |
| Bio 4 | 11.3 | 1286 | 1894.3 | ±32.51 | 1125.3 | 1207.3 | 1621.3 | 1833.3 | 2004.6 | 2451.5 | 3451.8 | 3270.7 | 594.3 | 0.3 | 290.3 | 383.3 |
| Bio 5 | 32.0 | 1286 | 237.8 | ±1.22 | 201.0 | 210.7 | 222.7 | 237.7 | 254.0 | 267.7 | 273.0 | 146.3 | 22.4 | 0.1 | 22.7 | 31.3 |
| Bio 7 | 0.1 | 1286 | 185.3 | ±1.43 | 146.1 | 153.0 | 169.0 | 180.0 | 209.3 | 215.3 | 227.0 | 132.7 | 26.1 | 0.1 | 30.6 | 40.3 |
| Bio 11 | 1.3 | 1286 | 121.4 | ±1.16 | 83.1 | 92.3 | 110.0 | 124.0 | 137.0 | 144.7 | 149.3 | 132.7 | 21.2 | 0.2 | 19.8 | 27.0 |
| Bio 13 | 1.5 | 1286 | 240.4 | ±4.18 | 123.7 | 142.3 | 185.5 | 235.8 | 296.0 | 335.3 | 368.3 | 470.7 | 76.4 | 0.3 | 83.0 | 110.5 |
| Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 8.5, Áreas de Bajo Impacto | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Var. | Contrib. | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bio 1 | 53.9 | 1180 | 154.6 | ±0.93 | 125.3 | 131.3 | 145.3 | 157.0 | 167.0 | 173.3 | 176.3 | 106.7 | 16.3 | 0.1 | 15.8 | 21.7 |
| Bio 4 | 11.3 | 1180 | 1887.7 | ±32.26 | 1119.5 | 1202.7 | 1658.7 | 1828.5 | 2018.7 | 2414.0 | 3422.3 | 3240.0 | 567.6 | 0.3 | 259.7 | 360.0 |
| Bio 5 | 32.0 | 1180 | 239.5 | ±1.22 | 204.3 | 212.7 | 225.3 | 240.0 | 255.3 | 268.0 | 274.3 | 140.7 | 21.3 | 0.1 | 22.2 | 30.0 |
| Bio 7 | 0.1 | 1180 | 199.2 | ±1.47 | 160.0 | 167.3 | 183.0 | 194.3 | 224.0 | 230.3 | 238.4 | 129.0 | 25.7 | 0.1 | 31.6 | 41.0 |
| Bio 11 | 1.3 | 1180 | 124.1 | ±1.18 | 85.6 | 96.6 | 114.0 | 127.3 | 139.3 | 146.3 | 150.7 | 134.3 | 20.7 | 0.2 | 18.3 | 25.3 |
| Bio 13 | 1.5 | 1180 | 226.9 | ±4.21 | 120.0 | 139.7 | 184.0 | 229.7 | 286.3 | 325.7 | 355.1 | 438.0 | 73.6 | 0.3 | 77.6 | 102.3 |

Media IC = intervalo de confianza de la media, 0,05, 0,95 = cuantiles de la variable bioclimática, DE = desviación estándar, CV = coeficiente de variación (%); DME = desviación absoluta media, IQR = rango intercuartílico

4.7. Respuesta de las variables bioclimáticas

Las variables que fueron seleccionadas en el modelo mostraron una respuesta cuadrática. Comúnmente la respuesta de las especies no es lineal y generalmente las curvas de respuesta son unimodales (Austin, 2002; Austin, 2007), por lo cual las curvas con una respuesta cuadrática pueden ser apropiadas. Los valores de las Bios 1, 4, 5, 7 y 11 muestran una correlación negativa con la idoneidad a excepción de los valores de la Bio 13 que muestran una correlación positiva con la idoneidad, mostrando una distribución sesgada a la derecha en las Bios 1, 4, 5, 7, 11 y 13. La idoneidad máxima es de 0.88 y una mínima de 0.0, mientras que las Bios muestran los siguientes rangos: Bio 1 (5.78 - 23.12 °C), Bio 4 (7.78 - 57.36 °C), Bio 5 (12.04 - 34.60 °C), Bio 7 (30.26 - 11.35 °C), Bio 11 (7.98 - 21.46 °C) y Bio 13 (42 - 781 mm) (Figura 9).



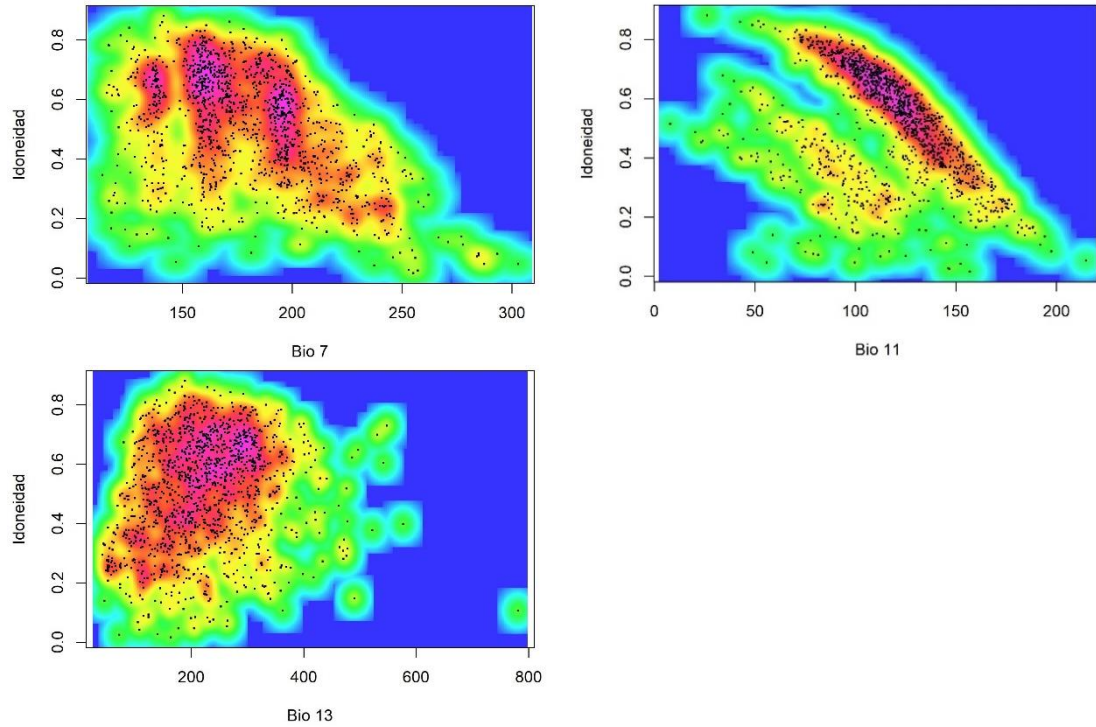


Figura 9. Respuesta de las variables bioclimáticas de acuerdo con la idoneidad, Bio 1(Temperatura media anual °C), Bio 4 (Temporalidad de la temperatura °C), Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido °C), Bio 7 (Intervalo de temperatura anual °C), Bio 11 (Temperatura media del 1/4 anual más frío °C), Bio 13 (Precipitación del mes más húmedo mm) para *Pinus pseudostrobus* Lindl.

5. CONCLUSIONES

Las variables que influyen en la distribución de *P. pseudostrabus* son Bio 1 (Temperatura media anual °C), Bio 4 (Temporalidad de la temperatura (desviación) °C) y Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido °C). Para México se predice una reducción de áreas con idoneidad alta (>0.66) desde 57.43 % hasta 81.61 %; las áreas de idoneidad media (0.33 - 0.66) muestran reducciones que van desde 30.71 % hasta 57.25 % y las áreas con baja idoneidad (<0.33) tendrán una ganancia de 7.98 % hasta 13.72 %. El presente estudio estima que para el año 2050 *P. pseudostrabus* no tendrá nuevas áreas idóneas en México, las áreas de alto impacto tendrán una extensión de 112,488.57 km² (RCP 4.5) y 140,758.84 km² (RCP 8.5) y las áreas bajo impacto tendrán una extensión de 140,947.66 km² (RCP 4.5) y 112,938.77 km² (RCP 8.5). A nivel mundial en ambos RCP's se presentan nuevas áreas idóneas en el sur de Alaska y el norte de Islandia, sin embargo, la Paridad Orientada a la movilidad las excluye casi en su totalidad. La adecuada selección de variables, la limpieza de los registros de presencia y una adecuada configuración del algoritmo de modelación son fundamentales para generar un modelo de nicho ecológico robusto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, L. A., & Poveda, G. (2008). Comparación de series de precipitación con los GCM CCSM3, ECHAM5, HADGEM1 y MIRO-C3. 2 HIREs; para el siglo XX en Colombia. In *Grupo red de Cooperación en Investigación sobre el agua (GRECIA), Escuela de Geociencias y Medioambiente de la universidad nacional de Colombia. Congreso latinoamericano de hidráulica*, 1-12.
- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2017). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52, 1043-1057.
- 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(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Austin, M. (2007). Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, 200(1-2), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.07.005>
- Austin, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, 157(2-3), 101-118. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(02\)00205-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(02)00205-3)
- Ávila-Coria, R., Villavicencio-García, R., & Ruiz-Corral, J. A. (2018). 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>
- Barrera Ramírez, R., González Cubas, R., Treviño Garza, E. J., González Larreta, B., & López Aguillón, R. (2020). Áreas potenciales para establecer Unidades Productoras

- de Germoplasma Forestal con dos variedades de *Pinus pseudostrobus* en México. *Bosque (Valdivia)*, 41(3), 277-287. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002020000300277>
- 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., Derbyshire, S. H., & Dharssi, I. (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>
- Bridle, J. R., & Vines, T. H. (2007). Limits to evolution at range margins: when and why does adaptation fail? *Trends in Ecology & Evolution*, 22(3), 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.11.002>
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G. F., Alkemade, J. M. Robert., & Guisan, A. (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, 12(6), 1079-1093. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01157.x>
- Burley, J. (1976). Genetic systems and genetic conservation of tropical pines. *In: Tropical trees: Variation, Breeding and Conservation*. Edited by J. Burley and B.T. Styles. Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute, Oxford University. Published for the Linnean Society of London by Academic Press. pp. 85- 100.
- Busby, J. R. (1986). Bioclimatic prediction system (BIOCLIM) user's manual version 2.0. *Australian Biological Resources Study Leaflet*.
- Calle, M. J. C., y Calzado, P. R. (2013). Evidencias y escenarios de cambio climático. *Revista de Obras Públicas*, 160(3545), 51-62.
- Camino, E. R., Ruggeroni, J. R. P., y Hernández, F. H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: *Bases físicas*. *Revista Tiempo y Clima*, 5(43),1-5.
- CATIE. 1997. Nota técnica sobre manejo de semillas forestales. *Pinus pseudostrobus* Lindl. No. 13. Turrialba, Costa Rica 53 p.
- Challenger, A., & Soberón, J. (2008). Los Ecosistemas Terrestres, en Capital Natural de

México. *Vol. I: Conocimiento Actual de la Biodiversidad*, 1-30.

- 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*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & 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*, XXII(2), 135-148. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., J. Hijmans, R., Huettmann, F., R. Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., G. Lohmann, L., A. Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC. M. Overton, J., Townsend Peterson, A., & J. Phillips, S. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Townsend Peterson, A. (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. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- Farjon, A., Pérez, J. A., & Styles, B. T. (1997). *A field guide to the pines of Mexico and Central America*. Royal Botanic Gardens; Oxford. London, UK. 147 p.
- Foden, W., Midgley, G. F., Hughes, G., Bond, W. J., Thuiller, W., Hoffman, M. T., Kaleme, P., Underhill, L. G., Rebelo, A., & Hannah, L. (2007). A changing climate is eroding the geographical range of the Namib Desert tree Aloe through population declines and dispersal lags. *Diversity and Distributions*, 13(5), 645-653. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00391.x>
- 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(19), 4973-4991. <https://doi.org/10.1175/2011jcli4083.1>

- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126-133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Grinnell, J. (1917). The niche-relationships of the California thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433. <https://doi.org/10.2307/4072271>
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147-186. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(00)00354-9)
- Guitérrez, E., y Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179-188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Hernández Carmona, O., García Ramírez, E. O., & Hernández Mendizábal, L. (2003). Variación en semillas de cinco procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Foresta Veracruzana*, 5(2), 23-28.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2), 56-61. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(99)01764-4)
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia of Quantitative Biology*, 22, 415-427.
- Infante Martínez, J. N. (2019). El cambio climático, un problema de todos. Universidad Cooperativa de Colombia, Bucaramanga. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12494.13865>.
- Illoldi-Rangel, P., y Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3, 7-12.
- IPCC. (2014) *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de*

trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrer, 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), 1-20. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kessell, S. R. (1979). *Gradient modeling resource and fire management*. New York, Heidelberg, Berlin Springer.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lorente, I., Gamó, D., Gómez, J. L., Santos, R., Flores, L., Camacho, A., Galindo, L. y Navarro, J. (2004). Los efectos biológicos del cambio climático. *Ecosistemas*, 13 (1), 103-110.
- Maciel-Mata, C.A.; Manríquez-Morán, N.; Octavio-Aguilar, P.; Sánchez-Rojas, G. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria* 25 (2), 3-19.
- Manzanilla Quiñones, U., Delgado Valerio, P., Hernández Ramos, J., Molina Sánchez, A., García Magaña, J. J., & Rocha Granados, Ma. del C. (2018). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana*, 126. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>
- Martínez-Sifuentes, A., Villanueva-Díaz, J., Manzanilla-Quíñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 13(1), 426-434. <https://doi.org/10.3832/ifor3491-013>
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies:

- Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
<https://doi.org/10.4067/s0716-078x2011000200008>
- Méndez-Encina, F. M., Méndez-González, J., Mendieta-Oviedo, R., López-Díaz, J. Ó. M., & Nájera-Luna, J. A. (2021). Ecological niches and suitability areas of three host pine species of bark beetle *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Forests*, 12(4), 385.
<https://doi.org/10.3390/f12040385>
- Montoya Oliver J. M., (1995). Efecto del cambio climático sobre los ecosistemas forestales españoles. En: “Seminario sobre Deterioro de los Montes y Cambio Climático”, Cuadernos de la SECF, nº 2:65-76.
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747-756 (2010).
<https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Muñoz Flores H. J., Sáenz Reyes, J. T., García Sánchez, J. J., Hernández Máximo, E., & Anguiano Contreras, J. (2019). Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 29-44.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i5.585>
- 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>
- Pardos, J. A. (1999). Ante un cambio climático: papel de los montes arbolados y los productos forestales en la retención del carbono. *Forest Systems*, 8(3), 93-99.
- Perry, D.A., 1994. *Forest Ecosystems*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, 649 p.
- Perry, J. P. 1991. *The pines of México and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 231 p.

- Peterson, A. T., & Soberón, J. (2012). Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. *Natureza & Conservação*, *10*(2), 102-107. <https://doi.org/10.4322/natcon.2012.019>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Eaton, M. (2007). Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, *30*(4), 550-560. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.05102.x>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, *213*(1), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, A. Townsend., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Bartley, J., Buddemeier, R. W., & Navarro-Sigüenza, A. G. (2001). Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling*, *144*(1), 21-30. [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(01\)00345-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(01)00345-3)
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, *31*(2), 161-175. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Plissock, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*, *48*, 61-79. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022011000100005>
- Pulliam, H. R. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, *3*(4), 349-361. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00143.x>
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramos-Dorantes, D. B., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., & Gernandt, D. S. (2017). Biodiversity,

- distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.028>
- Reynoso Santos, R., Pérez Hernández, M. J., López Baez, W., Hernández Ramos, J., Muñoz Flores, H. J., Cob Uicab, J. V., & Reynoso Santos, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.114>
- Richardson, D. M., & Whittaker, R. J. (2010). Conservation biogeography - foundations, concepts and challenges. *Diversity and Distributions*, 16(3), 313-320. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00660.x>
- Sánchez-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. <https://doi.org/10.17129/botsci.86>
- Sánchez, C. V., Townsend, A., & Escalante, P. (2001). Modelado de la distribución de especies y la conservación de la diversidad biológica. p. 359-379. In: H. Hernández, A. García-Aldrete, F. Álvarez & M. Ulloa (comp.) *Enfoques Contemporáneos en el Estudio de la Diversidad Biológica*. Instituto de Biología, UNAM y Fondo de Cultura Económica, México, D.F
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115-1123. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- 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(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0). <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Stockwell, D. R. B., & Peterson, A. Townsend. (2002). Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling*, 148(1), 1-13.

[https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(01\)00388-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(01)00388-x)

- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65-66.
- Téllez Valdés, O., Chávez Huerta, Y. M., Gómez-Tagle Chávez, A., & Gutiérrez Garduño, M. V. (2020). Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: estudio de cuatro especies de Pinus. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 29(95), 61-82.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Townsend Peterson, A., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Verzani, J. (2012). *Getting started with RStudio*. An Integrated Development Environment for R. O'Reilly Media. California, EE.UU.
- ViéJ. C., Hilton-Taylor, C., Stuart, S. N., & International Union For Conservation Of Nature And Natural Resources. (2009). *Wildlife in a changing world: an analysis of the 2008 IUCN red list of threatened species*. IUCN.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia*, 39(5), 575-587.
- Vozzo, J. A. (2002). *Tropical tree seed manual*. United States Department Of Agriculture. 663 p.
- 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(23), 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3679.1>

- Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2), 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Wiens, J. J., & Graham, C. H. (2005). Niche conservatism: integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36(1), 519-539. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102803.095431>
- Zorita, E., & Von Storch, H. (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.
- Zunino, M. & Palestrini, C. (1991). El concepto de especie y la biogeografía. *Animales de Biología*, 17(6), 85-88.