

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Distribución Actual Y Potencial De *Pinus patula* Schiede Ex Schltdl. & Cham. Bajo Escenarios De Cambio Climático

Por:

MARCO ANTONIO VERA MÉNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Distribución Actual Y Potencial De *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. Bajo
Escenarios De Cambio Climático

Por:

MARCO ANTONIO VERA MÉNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

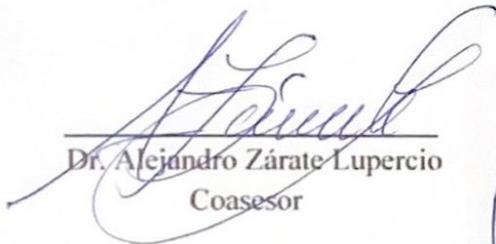
Aprobada por el Comité de Asesoría:



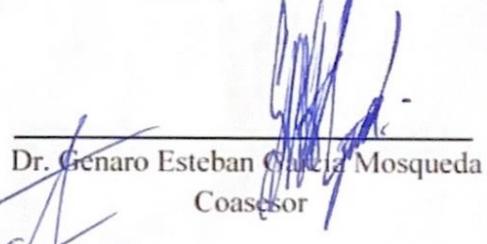
Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal Interno



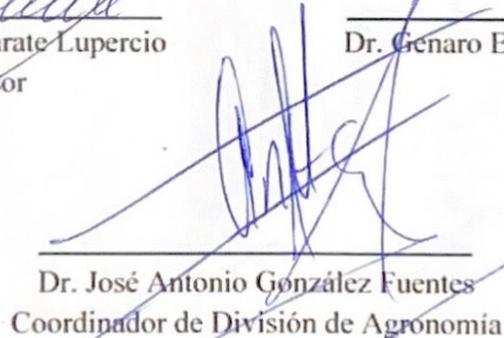
Dr. Andrés Flores García
Asesor Principal Externo



Dr. Alejandro Zárate Lupercio
Coasesor



Dr. Genaro Esteban Galeja Mosqueda
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021



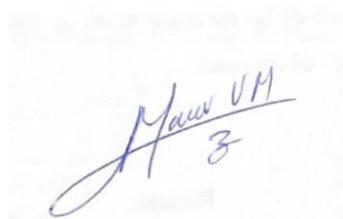
Declaración de no plagio

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marco VM' with a large flourish and the number '3' below it.

Marco Antonio Vera Méndez

Dedicatorias

A Dios por estar siempre conmigo y por darme esta oportunidad.

A mis Padres

Julieta Méndez González y Marco Antonio Vera, por darme amor, por motivarme a estudiar y por todo el apoyo que me han brindado durante toda mi vida y sobretodo en el transcurso de la carrera, además por querer siempre lo mejor para mí y esforzarse para que yo lo pueda lograr.

A mi Hermano

Oliver Vera Méndez por su cariño y por su motivación que me da.

A mis tíos

Jorge Méndez González y Paulina Basaldúa Sánchez, por confiar en mí para estudiar esta carrera y por el apoyo brindado desde siempre.

Agradecimientos

A mi Alma Terra Mater, por darme la oportunidad de forjarme como un profesionalista en el ámbito forestal.

A los Profesores del Departamento Forestal, por brindarme de sus conocimientos para poder formarme como un Profesionalista.

A mi tío el Dr. Jorge Méndez y a su familia, por creer en mí, por la paciencia que me han tenido y por todo el gran apoyo que me han dado durante toda la carrera, Muchas Gracias.

Al Dr. Andrés Flores, al Dr. Alejandro Zárate y al Dr. Genaro E. García, por el tiempo y por la contribución a este trabajo de Tesis.

A toda mi Familia en General, por el apoyo, los consejos y la motivación que me brindaron.

A mis Amigos y Compañeros de la Carrera, José Gil Solís Ruiz, Víctor Manuel Lira Moreno, Roberto Carlos Vásquez García, Erick Berteli Santizo Morales, por su amistad y por su ayuda durante toda la carrera. Y también a mis demás compañeros por los buenos y malos momentos que pasamos juntos.

A mis Amigos del Internado, Betin, Canelo, Joven, Chiguas, Manny, por el tiempo que convivimos y que vivimos juntos como hermanos.

A mis Amigos del Rancho, por sus conejos y por sus buenos deseos hacia mí.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1.- Objetivos.....	3
1.2.- Objetivo general	3
1.3.- Objetivos específicos.....	3
2.- REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1.- Área de distribución y descripción de <i>Pinus patula</i>	4
2.2.- Importancia de la especie	5
2.3.- Factores generales en la distribución de especies.....	5
2.4.- Diagrama de BAM	5
2.5.- Modelos de distribución de especies y nicho ecológico.....	6
2.6.- Cambio climático.....	7
2.7.- Modelos de Circulación General	7
2.8.- Trayectorias de concentración representativas	8
2.9.- Algoritmo y software usados en la modelación	8
2.9.1.- MaxEnt (Máxima Entropía)	8
2.9.2.- Programa estadístico R.....	8
2.10.- Estudios sobre distribución de especies	9
3.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	12

3.1.- Obtención y depuración de registros de la especie.....	12
3.2.- Obtención y selección de variables bioclimáticas	12
3.3.- Área de calibración (M).....	13
3.4.- Proceso de modelación	13
3.5.- Selección de modelo.....	14
3.6.- Estratificación de los mapas de idoneidad.....	15
3.7.- Estimación de la incertidumbre del modelo de nicho	15
3.8.- Validación de la transferencia del modelo de nicho.....	15
3.9.- Tipo de áreas idóneas identificadas al transferir el modelo de nicho.....	16
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1.- El modelo de nicho de <i>P. patula</i>	17
4.2.- Mejores predictores	18
4.3.- Espacio ambiental y geográfico de <i>P. patula</i>	21
4.4.- Respuesta de las variables ambientales	22
4.5.- Idoneidad actual y futura en el área de calibración	23
4.6.- Tasa de cambio de idoneidad climática actual con respecto al 2050	26
4.7.- Incertidumbre del modelo de nicho y transferencia del modelo	27
4.8.- Nuevas áreas idóneas y áreas de alto y bajo impacto	28
4.9.- Perfil bioclimático de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	34
5.- CONCLUSIONES	37
6.- BIBLIOGRAFÍA	38
7.- ANEXOS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nicho fundamental y realizado de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el espacio ambiental elaborado con Bio 1 (Temperatura, °Cx10) y Bio 12 (Precipitación, mm) (a), y espacio geográfico (b). Círculos en rojo corresponden a los registros de la especie y círculos en gris son los valores de Bio 12 y Bio 1 en México.....	22
Figura 2. Respuestas de las variables bioclimáticas de acuerdo a la idoneidad actual estimada para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	23
Figura 3. Idoneidad actual (a) y futura al 2050 (b - g) en el área de calibración estimada a través de máxima entropía para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., empleando tres modelos de circulación general, CCSM4 (b-c) HADGENM (d-e) y MIROC5 (f-g) en dos trayectorias de concentración de CO ₂ RCP 4.5 (b, d y f) y 8.5 (c, e y g).	24
Figura 4. Superficie por estrato de idoneidad climática actual en el área de calibración para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	25
Figura 5. Incertidumbre promedio (coeficiente de variación) de las predicciones de idoneidad climática de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general (MCG) en los RCP 4.5 (a) y 8.5 (b) al 2050. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promedio de tres MCG, en el RCP 4.5 (c) y 8.5 (d).....	28
Figura 6. Clasificación de áreas de idoneidad estimadas para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el área de calibración, M (a y c) y en todo el mundo (b y d), promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 4.5 (a y b) y RCP de 8.5 (c y d).	30
Figura 7. Relación de idoneidad con altitud (a) y distribución altitudinal para cada tipo de área predicha (b) para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	32
Figura 8. Cambios en temperatura esperados al 2050, sobre el área de distribución actual de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. promedio de tres MCG, relacionados a la altitud y latitud, en dos variables de mayor contribución, Bio 5 (a) y Bio 6 (b).....	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables utilizadas para modelar la distribución actual y a futuro de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. Los números entre corchetes indican el componente del que se eligieron.	14
Cuadro 2. Número de modelos candidatos generados, estadísticos de ajuste y validación para la modelación de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	18
Cuadro 3. Contribución e importancia de permutación de las variables climáticas utilizadas para modelar la distribución actual y futura de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	19
Cuadro 4. Tasa de cambio de la superficie de idoneidad actual con respecto a las estimaciones para el año 2050 para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., utilizando el modelo de nicho con las proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general.	26
Cuadro 5. Clasificación de áreas de idoneidad de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., a nivel global al 2050, predichas a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos vías de concentración representativas, RCP's 4.5 y 8.5.	31
Cuadro 6. Contribución relativa de las variables al modelo de idoneidad de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., acorde a la prueba de Jackknife y perfil bioclimático detallado actual y futuro.	35

RESUMEN

Una medida para estimar el comportamiento de la distribución de especies ante el cambio climático y predecir áreas idóneas al futuro es generar modelos de nicho ecológico, los cuales relacionan variables ambientales con registros de presencia de la especie. El objetivo del presente estudio fue modelar la distribución actual y potencial de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, a partir de 267 registros de presencia de la especie, con 15 variables bioclimáticas actuales (1979-2013) y futuras (2050) de tres Modelos de Circulación General (MCG): CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5, en dos escenarios de emisiones de CO₂, o vías de concentración representativas, RCP's: 4.5 y 8.5. Los procesos de modelación se realizaron en R con el paquete "kuenm", el cual usa el programa de MaxEnt como algoritmo de modelación. Se generaron 147 modelos candidatos de los cuales se eligió el que cumplió con los criterios establecidos, tiene respuesta lineal, cuadrática y producto y utiliza 5 variables bioclimáticas: Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 13 y Bio 17, con una contribución de 56.04, 16.34, 10.84, 9.32 y 7.42 %. El modelo de nicho predice que al 2050, las áreas de idoneidad alta (> 0.48) para esta especie podrían reducirse en promedio entre 25 y 28 %, en un RCP 4.5 y 8.5. Las áreas más vulnerables al cambio climático donde se distribuye *P. patula* se registran sobre mayores latitudes y menores altitudes y parece obedecer a un incremento de casi 2 °C (Bio 5) en esas regiones. Se predicen nuevas áreas idóneas en menores altitudes que donde actualmente se distribuye la especie, se ubican principalmente en Sudamérica. Independientemente del escenario climático al 2050 (RCP 4.5 y 8.5) la especie *P. patula* podría verse afectada en su distribución geográfica.

Palabras clave: distribución natural, cambio climático, variables climáticas, nicho ecológico, *P. patula*, MCG.

ABSTRACT

One way to estimate the impact of the distribution of species in the face of climate change and predict suitable areas for the future is to generate ecological niche models, which relate environmental variables with records of the presence of the species. The objective of this study was to model the current and potential distribution of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham, using 267 records of the presence of the species, 15 current bioclimatic variables (1979-2013) and future (2050) of three General Circulation Models (MCG): CCSM4, HadGEM2-AO and MIROC5, in two scenarios of CO₂ emissions, or representative concentration routes, RCP's: 4.5 and 8.5. The modeling processes were carried out in R with the "kuenm" package, which uses the MaxEnt program as the modeling algorithm. A total of 147 candidate models were generated from which the one that met the established criteria was chosen, has a linear, quadratic and product response and uses 5 bioclimatic variables: Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 13 and Bio 17, with a contribution of 56.04, 16.34, 10.84, 9.32 and 7.42%. The niche model predicts that by 2050, the areas of high suitability (> 0.48) for this species could be reduced on average between 25 and 28%, in an RCP 4.5 and 8.5. The areas most vulnerable to climate change where *P. patula* is distributed are recorded at higher latitudes and lower altitudes and it seems to be due to an increase of almost 2 °C (Bio 5) in those regions. New suitable areas are predicted at lower altitudes than where the species is currently distributed, they are located mainly in South America. Regardless of the climatic scenario in 2050 (RCP 4.5 and 8.5) the species *P. patula* could be affected in its geographical distribution.

Keywords: natural distribution, climatic change, climatic variables, ecological niche, *P. patula*, MCG.

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

México es un país con una riqueza natural extraordinaria (Martínez *et al.*, 2014), ya que alberga alrededor de 49 especies de *Pinus* (Gernandt y Pérez 2014). La mayoría de las estas especies se usan con fines comerciales, siendo fuente importante de producción de madera, celulosa y resina, entre otros productos (Sánchez, 2008). Dentro de estas especies se encuentra el *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., que se distribuye de manera natural a lo largo de la Sierra Madre Oriental, en el Eje Neovolcánico Transversal y sobre la Sierra Madre del Sur (Perry, 1991). Además de ser adecuado para la producción de madera en rollo (110 029.69 m³ en promedio/año (Flores y Moctezuma, 2021), también se utiliza para la producción de resina y constituyentes de aceite de trementina (Tesfaye *et al.*, 2020), es de rápido crecimiento y de alto rendimiento, la madera es de poco olor y además se puede trabajar fácilmente (Wormald, 1975).

Esta especie es de gran importancia en el tema de plantaciones industriales forestales por su excelente crecimiento (Ladrach, 1985) y en plantaciones de restauración (Flores *et al.*, 2021). Se ha plantado extensamente como especie exótica en lugares ubicados en gran parte de África, en Asia, en Oceanía, en el Caribe y Sudamérica (Escobar, 1967; Wormald, 1975).

Estudios científicos muestran que las especies a lo largo de la historia de la vida, han estado expuestas a cambios evolutivos en clima, pero en la actualidad esos cambios han sido más acelerados (Thuiller *et al.*, 2011), debido a las actividades antropogénicas, lo que provocó que el ritmo de estos cambios aumentara (IPCC, 2014). El mayor responsable de estos cambios es CO₂, que es uno de los cuatro gases de efecto invernadero que generan las actividades humanas, ocupando el 56.5 % en relación con los demás gases (Díaz, 2012). Los bosques contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático al almacenar el CO₂ atmosférico mediante el proceso de la fotosíntesis (Pardos, 2010).

Se dice que la distribución de las especies está determinada por las condiciones bioclimáticas, topográficas y de suelos, que dominan el sitio donde crecen (Busby, 1986; Cruz *et al.*, 2016; Fourcade *et al.*, 2018; González *et al.*, 2020). Para entender más sobre la distribución de las especies, Soberón y Peterson, (2005) propusieron el diagrama «BAM» en el que se indica que: i) deben existir las condiciones abióticas necesarias («A»), ii) condiciones bióticas favorables («B») y iii) hayan estado accesibles a la dispersión de la especie desde la región de su origen histórico («M»). En la actualidad, se dice que la distribución y la diversidad de especies se verán modificadas en el futuro debido a cambios en precipitación y aumentos de temperatura (Soberón y Peterson, 2005; Broennimann *et al.*, 2006; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Sáenz *et al.*, 2015; Allen, 2018).

Para predecir la distribución de especies se ha utilizado el modelado de especies fundamentado en nichos ecológicos (Phillips *et al.*, 2006), con éstos y con el uso de modelos de circulación general (MCG) es posible evaluar el posible impacto del cambio climático en la distribución de especies (Fernández *et al.*, 2015), en conjunto con las Vías de Concentración Representativas (RCP) (Moss *et al.*, 2010). Los MCG son modelos basados en ecuaciones matemáticas que simulan la concentración de gases en la atmósfera (Acevedo y Poveda, 2008), estos tienen cuatro diferentes escenarios de emisiones de concentración de CO₂ que se denominan RCP (Moss *et al.*, 2010). Para realizar este modelado existen varios algoritmos (Elith *et al.*, 2006), como por ejemplo BIOCLIM (Busby, 1991), GARP (Stockwell y Peters, 2002), Biomapper (Hirzel *et al.*, 2002), MaxEnt (Phillips *et al.*, 2005), kuenm (Cobos *et al.*, 2019), entre otros.

Según modelos climáticos, la biodiversidad actual de *Pinus* spp. experimentará tres alternativas: tolerar alteraciones en el clima; extinguirse local o regionalmente y sufrir cambios en la distribución actual (Cruz *et al.*, 2016). En la actualidad se han hecho pocos estudios sobre distribución de *P. patula*. Van Zonneveld *et al.* (2009), estudiaron *P. patula* con el objetivo de evaluar el impacto del cambio climático en la persistencia de las poblaciones naturales en su ubicación real para tomar las medidas de conservación adecuadas. Pérez *et al.* (2012), realizaron un estudio con el objetivo de identificar la distribución potencial actual y bajo escenarios del cambio climático con MCG al 2030 para *P. Patula* y *P. pseudostrobus* Lindl. En ese mismo año, Monterroso *et al.* (2012), estudiaron

las condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático para especies representativas del bosque mesófilo de montaña entre ellas el *P. patula*. Autores como Aceves et al. (2018) realizaron un estudio con objetivos de identificar las variables climáticas que influyen en el establecimiento de *P. patula* y otras especies del género *Pinus*. Estos estudios que se han hecho no presentan superficies nuevas de idoneidad al futuro, entonces como parte del presente estudio, además de identificar las áreas potenciales actuales de la especie, se pretende encontrar las nuevas áreas idóneas al futuro dentro del área de calibración y a nivel global, así como ver cuáles son las áreas que se verán más afectadas por el cambio climático al año 2050.

1.1.- Objetivos

1.2.- Objetivo general

Evaluar los efectos del cambio climático sobre la distribución geográfica actual y futura de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., a través de un modelo de nicho ecológico, empleando variables bioclimáticas actuales y tres Modelos de Circulación General, bajo dos escenarios de concentración de CO₂: 4.5 y 8.5.

1.3.- Objetivos específicos

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

Crear el perfil bioclimático actual y futuro de *Pinus patula*, acorde a las variables bioclimáticas que determinan su distribución.

Evaluar el impacto del cambio climático sobre las áreas donde se distribuye *Pinus patula*, identificando nuevas áreas idóneas, así como áreas de alto y bajo impacto para la especie.

2.- REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.- Área de distribución y descripción de *Pinus patula*

El área de distribución actual de *P. patula*, que va desde el noreste hasta el sur de México. *Pinus patula* (ocote) pertenece al grupo serótino de conos cerrados y persistentes de gran tamaño, es nativo de América central; mide de 20 a 40 m de altura y puede crecer hasta 1 m de diámetro; desarrolla corteza escamosa de color rojiza en la parte superior del tallo y en las ramas. Por lo general, se encuentra en regiones cálidas a frescas donde la precipitación media anual oscila entre 600 y 2 500 milímetros y la temperatura anual promedio, entre 12 y 18 °C (Wormald, 1975).

Se establece en suelos ácidos con un pH entre 4.5 y 5.5, preferentemente en suelos profundos de margas arenosas a arcillas arenosas, y elevaciones que van de 1,500 a 3,100 metros sobre el nivel del mar. Se distribuye naturalmente sobre las formaciones montañosas de la Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y la Sierra Madre de Oaxaca (Dvorak y Donahue, 1992).

En esta especie las flores y los frutos aparecen en la misma planta de forma separada, los conos son de color amarillos y ocurren abundantemente en racimos en vástagos nuevos (parte inferior de la copa). Los conos femeninos son de color púrpureo, con espigas deciduas, y aparecen de manera solitaria y en grupos (parte superior de la copa). Este pino florece entre enero y abril, en su entorno natural las flores empiezan a aparecer a los tres años, pero la producción abundante de frutos se da a los 8 y 10 años; los conos maduros aparecen en grupos de 3 a 6, son cónicos (con un grosor de 2.5 a 4 cm), y largos (4 a 12 cm), por lo general son sésiles, es decir, que raramente tienen pedúnculo, además son ligeramente curvos y de color lustroso que va de gris a marrón, las escamas de los conos son duras y miden 2 cm de largo por 1 cm de ancho; los conos maduran después de los 22 a 30 meses y siguen persistiendo los conos hasta por dos años más ya que son conos seróticos (Escobar, 1967; Wormald, 1975).

2.2.- Importancia de la especie

Pinus patula es una especie de rápido crecimiento y de alto rendimiento, la madera es de poco olor y además se puede trabajar fácilmente (Wormald, 1975), es adecuada para la producción de postes y de madera en rollo ya que produce 110 029.69 m³ en promedio/año (Flores y Moctezuma, 2021), tiene buena conformación de copa, presenta fuste recto y produce madera de calidad, ya que no presenta nudos por su poda natural que presenta (Nyoka, 2002), también se utiliza para la producción de resina y constituyentes de aceite de trementina (Tesfaye *et al.*, 2020). Esta especie es de gran importancia en el tema de plantaciones industriales forestales por su excelente crecimiento a pesar que es de distribución natural muy restringida (Ladrach, 1985), y en plantaciones de restauración (Flores et al., 2021). Por sus cualidades esta conífera es la más utilizada en trópicos y subtropicos, se ha plantado extensamente como especie exótica en el centro y sur de América, Sudáfrica, África del Este, África del Oeste, Nueva Zelanda y Australia (Escobar, 1967; Wormald, 1975).

2.3.- Factores generales en la distribución de especies

Las condiciones abióticas (entorno físico, la edafología, aspectos climáticos, etc.), los factores bióticos (interacciones positivas y negativas, las cuales permiten que las poblaciones se mantengan), las áreas idóneas para la distribución de la especie y la capacidad de la especie para adaptarse a nuevas condiciones —de acuerdo a la evolución de las poblaciones—, son los cuatro factores que determinan el desarrollo de las especies (Soberón y Peterson, 2005). De acuerdo a Pearson y Dawson (2003) y Mateo et al. (2011) la distribución está condicionada por la interacción de estos factores en la misma escala de tiempo, pero con diferentes intensidades y responde a procesos complejos donde las relaciones bióticas tienen una influencia importante.

2.4.- Diagrama de BAM

El diagrama BAM explica que una especie tiene altas posibilidades de distribuirse en áreas donde se cumplan tres aspectos: que existan condiciones abióticas (A) necesarias, que el

medio biótico de la especie sea favorable (B) y que esas áreas estén dentro de las capacidades de dispersión de la especie (M) (Soberón y Peterson, 2005).

2.5.- Modelos de distribución de especies y nicho ecológico

Los modelos de distribución de especies son representaciones cartográficas con valores de idoneidad, los cuales están basados en datos reales tomados en áreas con presencia de una especie, donde existen las condiciones necesarias para desarrollarse (Mateo *et al.*, 2011).

En los modelos de distribución de especies se utilizan diferentes tipos de variables, las cuales pueden ser climáticas, topográficas, geológicas y de diferentes tipos que de manera individual o en conjunto pueden llegar a determinar las condiciones ambientales que se necesitan para que exista presencia de la especie (Guisan y Zimmermann, 2000).

Los modelos de distribución de especies deben cumplir tres condiciones: la primera es que exista una relación potencial de las variables usadas para modelar y la distribución de la especie en estudio (Hirzel y Lay, 2008), la segunda es que expongan una variabilidad adecuada en la zona de estudio (Mateo *et al.*, 2011) y por último que sean independientes o que no muestren una correlación excesiva entre sí (Graham, 2003).

Los modelos de nicho o modelos de distribución potencial de especies en los últimos años han sido muy utilizados en diversos campos de la ecología y se han convertido en una de las áreas de mayor investigación para la biogeografía (Richardson y Whittaker, 2010).

El modelo de nicho ecológico o de distribución de especies es una alternativa para estimar el impacto del cambio climático sobre el espacio geográfico de especies (Peterson, 2006) y es una herramienta importante para la conservación de estas (Guisan y Thuiller, 2005).

El nicho ecológico se define como las condiciones bióticas y abióticas que necesita una especie para sobrevivir. Existen dos tipos de nicho ecológico: el fundamental, que hace referencia al conjunto total de condiciones en las cuales una especie puede vivir, y el realizado, que se refiere al conjunto total de condiciones en las que un organismo puede vivir interactuando con otras especies (Krebs, 1985; Miller *et al.*, 1994; Vázquez, 2005).

2.6.- Cambio climático

Díaz (2012), dice que la degradación medioambiental es un hecho, la cual se manifiesta en diferentes sucesos como, contaminación de los cuerpos de agua, extinción de las especies, pobreza, enfermedades, contaminación del aire, cambios en el clima, desastres naturales. En cuanto al cambio climático sus efectos son: prolongadas precipitaciones, aumento de la temperatura, períodos largos de sequía, cambio de dirección de los vientos, deshielo en los polos, cambios en las migraciones de los animales, tormentas, ciclones, maremotos y aumento del nivel del mar. Además, informes que ha presentado el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) en varios años, indican que es probable que las temperaturas mundiales cambien entre 1.7 y 4.8 °C durante el siglo XXI. El CO₂ es uno de los cuatro gases de efecto invernadero de larga permanencia que generan las actividades humanas, ocupando el 56.5 % en relación con los demás gases; según los científicos el efecto invernadero es el responsable en los cambios del clima (Díaz, 2012).

Las consecuencias del cambio climático en los recursos forestales se reflejarán en las especies, ya que se ven afectadas por los cambios en precipitación y en temperatura, lo cual incitará su migración (Sáenz *et al.*, 2015). Además, en el futuro, estos cambios también traerán plagas más persistentes para las especies (Raynal-Villaseñor, 2011).

El cambio climático hace necesaria una valoración correcta de sus impactos para poder establecer las mejores estrategias de adaptación y definir las medidas de mitigación más adecuadas (Hughes, 2000).

2.7.- Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General (MCG) son modelos tridimensionales a nivel global, basados en ecuaciones matemáticas (Acevedo y Poveda, 2008), los cuales tienen como función principal simular la concentración de gases en la atmósfera, tomando en cuenta, la humedad, las nubes y los vientos, y al simular en los océanos se considera la temperatura, corrientes marinas y la salinidad (Magaña *et al.*, 1997). Los MCG son la herramienta adecuada para estimar proyecciones climáticas y evaluar el cambio climático (Zorita y Storch, 1991). En la actualidad los MCG se encuentran disponibles por varios grupos de

investigación y las diferentes simulaciones están fundamentadas en distintas condiciones experimentales iniciales, y en diferentes algoritmos (Harrison *et al.*, 2016).

2.8.- Trayectorias de concentración representativas

También conocidas como RCP`s son escenarios que muestran concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). Existen 4 diferentes RCP`s: 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5; el RCP 8.5 tiene un forzamiento radiativo de $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$ teniendo una ruta creciente en el próximo siglo, el RCP 4.5 tiene un forzamiento radiativo de $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ con una ruta estabilizada sin excederse en el próximo siglo (Moss *et al.*, 2010).

2.9.- Algoritmo y software usados en la modelación

2.9.1.- MaxEnt (Máxima Entropía)

MaxEnt está enfocado en la modelación de solo presencia para la distribución de especies, por tanto está listo para ser usando en cualquier tipo de datos que solo incluyan presencias, y utiliza el principio de máxima entropía ajustando la distribución de especie a los pixeles del área estudiada, para relacionar los datos de presencia con las variables ambientales y así estimar el nicho de la especie junto a su distribución geográfica potencial basada en los valores de los pixeles de la especie estudiada (Phillips *et al.*, 2006). No es necesario ingresar ausencias ya que son generadas por Maxent, llamadas *background* (Mateo *et al.*, 2011).

2.9.2.- Programa estadístico R

El programa R fue creado en 1992 en Nueva Zelanda por Ross Ihaka y Robert Gentleman, este utiliza un lenguaje de programación interpretado, de uso libre, de código abierto y gratuito, y se mantiene en un ambiente para el cómputo estadístico y gráfico, fundado sobre comandos. Facilita las opciones y procedimientos a través de sintaxis que está disponible para numerosos sistemas operativos, entre ellos Windows, MacOS y Linux. Se caracteriza como un sistema totalmente planificado y coherente. La funcionalidad de R consta de paquetes modulares. El sistema base de R contiene el paquete básico que se requiere para su ejecución y la mayoría de las funciones fundamentales (Ihaka y Gentleman, 1996). En la actualidad se está utilizando en universidades ya que R crea la programación para el análisis

estadístico y gráfico de datos, y conforme pasa el tiempo se ha vuelto más popular entre los investigadores de todas las áreas disciplinarias (Avello y Seisdedo, 2017).

2.10.- Estudios sobre distribución de especies

Aceves et al. (2018) modelaron la distribución potencial de 20 especies de *Pinus* (entre esas *P. patula*), con diferentes números de registros para cada una. Utilizaron 19 variables climáticas derivadas de temperatura y precipitación del periodo 1950-2000, las cuales se obtuvieron del sitio web WorldClim (en formato raster de 1 km² de resolución) y las variables de altitud, exposición y pendiente.

Los modelos de distribución potencial se generaron con el programa MaxEnt versión 3.3.3. Del total de registros de la especie, se utilizó la mitad para entrenamiento y el resto para prueba. Los modelos se evaluaron con pruebas curva de respuesta (análisis de omisión/comisión), sensibilidad Curva Operada por el Receptor (ROC) y Área bajo la curva (AUC), como lo han sugerido expertos en el tema (Elith *et al.*, 2006; Aguirre y Duivenvoorden, 2010).

Para medir el efecto de cada variable en el modelo se utilizaron pruebas de Jackknife (Hijmans *et al.*, 2005; Ramos-Dorantes *et al.*, 2017). Además, se realizó un análisis de componentes principales usando una matriz estandarizada de contribución de cada variable bioclimática y topográfica para conocer el comportamiento en función a variables Bioclim.

Como resultados obtuvieron que, en la evaluación de modelos de predicción, la prueba estadística área bajo la curva ROC establece que los modelos de predicción son sensibles para especies con menos de 340 registros; para especies con más de 470 registros el ajuste es muy bueno, ya que en el análisis de omisión/comisión en la muestra de entrenamiento como en la prueba, la tasa de omisión es cercana a la omisión estimada. Se demostró que la modelación de cualquier especie depende de la cantidad y calidad de los datos como lo han demostrado algunos autores (Stockwell y Peterson 2002). El promedio de los AUC de todas las especies fue 0.9589, lo cual este valor es muy bueno ya que valores de AUC mayores a 0.75 indican que las predicciones basadas en solo datos de presencia son lo suficientemente precisas para establecer planes de manejo (Elith *et al.*, 2006 y Aguirre y Duivenvoorden, 2010).

Ellos exponen que la modelación de la distribución potencial de coníferas de su estudio mediante MaxEnt se puede considerar confiable, ya que otros estudios tienen menor valor promedio de AUC y se consideran confiables. Las variables ambientales altitud, Bio 10 y Bio 1, son las que más contribuyen a predecir la distribución de la mayoría de estas especies estudiadas. Sin embargo, dicha contribución, puede cambiar dependiendo de la especie, esto fue debido a que el perfil bioclimático es diferente entre especies y es dependiente de la distribución natural de la especie. Para *P. patula*, las variables que más contribuyen al modelo fueron Bio 10 (36.5 %), Bio 7 (13.3 %) y Bio 5 (12.3 %). Se confirma que cada especie tiene requerimientos bioclimáticos específicos. Además, el perfil bioclimático determinado para cada especie es relevante para establecer planes de manejo e incrementar su potencial productivo. En cuanto a la idoneidad climática encontraron una superficie de 4718 km² para *P. patula*, dicha superficie se encuentra principalmente en los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz.

Pérez et al. (2012) estudiaron escenarios de distribución de *P. patula* y *P. pseudostrobus*, con modelos de cambio climático en el estado de México. Generaron modelos de cambio climático a escala regional al 2030 y 2050, empleando variables climáticas como precipitación total y temperatura media anual y variables edáficas (pH del suelo, textura y profundidad). La precipitación total anual y la temperatura media anual se crearon a partir de la base de datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Forestales (INIFAP). En el Estado de México, *P. patula* presenta una aptitud alta de 181 304.73 ha (equivalente a 64.11 % de la superficie forestal de coníferas de la entidad), y una media de 273 359.61 ha (equivalente a 96.66 %). La aptitud actual con nivel alto de *P. patula* escasamente existe en la zona sur de la entidad. La extensión de la aptitud media es más amplia que la aptitud alta. Las principales limitantes para el desarrollo de *P. patula* en estas áreas son la altitud, profundidad del suelo y temperatura media. La distribución potencial de *P. patula* en el Estado de México con escenarios de cambio climático tiende a reducirse de manera importante (5.9 a 46.8 %).

Monterroso et al. (2012), realizaron un estudio para evaluar el posible comportamiento del bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, bajo escenarios de cambio climático. El trabajo se desarrolló con el programa Biomapper, bajo el concepto de nicho ecológico

(Hirzel *et al.*, 2002). Este consiste en usar una técnica que encuentra los intervalos de las variables ambientales donde la especie puede vivir en condiciones óptimas a partir de los sitios donde la especie está presente. Se consideraron seis variables climáticas: tipo de clima, precipitación total anual, precipitación horizontal (aporte de humedad por la presencia de niebla), temperatura media anual, evapotranspiración actual, meses del año con demasías de agua; además, cinco variables paisajísticas: tipo de suelo, uso de suelo y vegetación, humedad almacenada en el suelo, vegetación natural y secundaria, presencia de bosque mesófilo de montaña; y una variable topográfica (topoformas). Se analizaron 8 especies, entre ellas *P. patula*. Los registros de presencia se obtuvieron en campo mediante una distribución al azar de 15 puntos de muestreo y parcelas de 250 m² ubicadas en el área de bosque mesófilo. Se realizó un análisis de componentes principales para ver el comportamiento de las variables. Además de esto se calculó el factor de especialización, que sirve para ver qué tan amplio es el nicho ecológico de la especie, el valor de este factor va de 0 a 1, donde el valor sea más cercano a 0 la planta es muy “especializada”, es decir, que la especie tiende a requerir condiciones muy estrechas o limitadas y un valor cercano a 1 indica que la especie no es “exigente” con el medio que la rodea. Se utilizaron dos modelos de cambio climático: el European Centre Hamburg Model (ECHAM5) y el Hadley Centre Global Environmental Model (HADGEM), bajo el escenario de emisiones A2 para el año 2050.

De todas las especies estudiadas, *P. patula* es la que requiere condiciones ambientales más particulares para su crecimiento. La especialización encontrada fue 0, indicando las condiciones ambientales concretas se requieren en la zona de estudio para el crecimiento y desarrollo de la planta. Encontraron que para *P. patula* únicamente 2.7 % del área es óptima para la especie y 77 % es inconveniente, en condiciones actuales. En cuanto a los dos escenarios de cambio climático concuerdan en que la superficie será de 1.6 % para el primero y poco más de 95 % para el segundo; es decir, los modelos sugieren que la superficie en condiciones óptimas disminuirá 1 %, mientras que la superficie sin aptitud aumentará al menos 18 %.

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Obtención y depuración de registros de la especie

Los registros de presencia de la especie *P. patula*, se obtuvieron de varias fuentes: Red Mundial de Información sobre la Biodiversidad (REMIB), Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y en consultas de artículos científicos. La limpieza consistió en eliminar registros duplicados, datos fuera de los continentes, área de distribución (establecida en la descripción de la misma), rango altitudinal (tolerancia de ± 150 m), y de la elipse creada (99 %) con un Análisis de Componentes Principales (PCA) (usando 15 variables bioclimáticas y la altitud en el paquete FactoMineR de R (Lê *et al.*, 2008)). Por último, se eliminó la autocorrelación entre registros, con el paquete Sp-thin (Aiello-Lammens *et al.*, 2015) en el programa estadístico R, haciendo una limpia por espaciamiento a 5 km.

3.2.- Obtención y selección de variables bioclimáticas

Del portal CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas), se obtuvieron 15 variables bioclimáticas (Bios) del periodo 1979-2013, en formato digital y remuestreadas a 5 km², para predecir la distribución actual y las mismas variables del periodo 2040-2060, de tres MCG: CCSM4 (Gent *et al.*, 2011), HadGEM2-AO (Martin *et al.*, 2011) y MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010), en dos trayectorias de concentración de dióxido de carbono (RCP, por sus siglas en inglés), 4.5 y 8.5, para predecir la distribución futura de la especie (Karger *et al.*, 2017).

La selección de variables bioclimáticas se basó en cuatro criterios: 1) mayor contribución obtenido del ACP (Méndez *et al.*, 2021) —realizado con el paquete FactoMineR (Lê *et al.*, 2008) para extraer el valor de las 15 variables bioclimáticas de cada registro de presencia con datos estandarizados y elegir las variables de mayor contribución—; 2) variables no correlacionadas ($r < 0.8$), obtenida mediante un análisis de correlación paramétrica (Pearson);

3) distribución de frecuencia de la variable (normal o sesgada); y 4) capacidad predictiva de la variable, modelando con las variables individualmente. Las variables Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 se descartaron porque arrojan resultados sesgados ya que combinan información de temperatura y precipitación en la misma capa (Escobar *et al.*, 2014).

3.3.- Área de calibración (M)

El área M es donde la especie se puede desarrollar debido a su capacidad de dispersión o por algún medio de inducción se puede establecer (Soberón y Peterson, 2005). Esta área se delimitó empleando ArcMap v.10.5 con los registros de presencia, después de finalizar el proceso de limpieza de los registros. Se creó un área buffer de 100 km alrededor de cada registro. El área de calibración debe incluir la totalidad de la distribución de la especie, ya que, si no, la función de respuesta puede no tener la forma predicha (Guisan *et al.*, 2014), ni tampoco se tendrá completo el espectro del nicho realizado ni del nicho fundamental, así mismo, la contribución de la variable será errática.

3.4.- Proceso de modelación

Se realizó la modelación empleando el programa R, con el paquete *kuenm* (Cobos *et al.*, 2019) y con MaxEnt como algoritmo, el cual realiza procesos de calibración, creación, evaluación y validación de la transferencia de los modelos. La modelación se realizó con aproximadamente 80 % de los registros, mientras que la validación con el 20 % restante. Se usaron 7 tipos de respuestas: l, q, p, lq, lp, qp, lqp (lineales= l, cuadráticas= q, producto= p) y 7 configuraciones de multiplicador de regularización (0.1, 0.4, 0.7, 1, 2, 3, 4).

Con las variables preseleccionadas en el ACP por su mayor contribución (Cuadro 1), se crearon tres grupos (*set*) conformados según se indica en el mismo cuadro, para elegir el *set* de mejor predicción en *kuenm*. El formato de salida fue de tipo logístico, que puede interpretarse como probabilidad de presencia (Phillips *et al.*, 2008). La transferencia del modelo final de nicho se creó a través de tres modalidades: extrapolación libre, extrapolación clamping y sin extrapolación. En la extrapolación libre, la respuesta de las áreas ambientalmente diferentes del área de calibración, presentaron una tendencia similar a los datos ambientales de calibración; la extrapolación clamping, fue determinada por los niveles

que se presentan en la periferia del área de calibración del espacio ambiental; y finalmente, la no extrapolación, es donde la respuesta se vuelve cero en caso de que las áreas de transferencia sean más extremas en comparación con las del área de calibración (Cobos *et al.*, 2019). Los modelos resultantes (mapas en formato raster) contienen valores continuos que van de 0 a 1, y representan la idoneidad (Phillips *et al.*, 2006).

Cuadro 1. Variables utilizadas para modelar la distribución actual y a futuro de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. Los números entre corchetes indican el componente del que se eligieron.

Variable	Descripción	PCA	Set 1	Set 2	Set 3
Bio 1	Temperatura media anual (°C)	9.45 [1]			
Bio 2	Intervalo medio diurno (Temp. Máx – Temp. Min.)	7.22 [1]			
Bio 3	Isotermalidad (Bio 2 / Bio 7)*(100)	6.46 [2]	*	*	
Bio 4	Temporalidad de la temperatura (desviación)	10.80 [2]	*		
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	10.65 [2]	*	*	*
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	11.49 [1]	*	*	*
Bio 7	Intervalo de temperatura anual (Bio 5 - Bio 6)	11.70 [2]	*	*	*
Bio 10	Temperatura media del 1/4 anual más cálido (°C)	9.43 [2]			
Bio 11	Temperatura media del 1/4 anual más frío (°C)	9.89 [1]			
Bio 12	Precipitación anual (mm)	9.16 [2]			
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo (mm)	8.14 [2]	*	*	*
Bio 14	Precipitación del mes más seco (mm)	9.07 [1]			
Bio 15	Temporalidad de la precipitación (CV)	2.37 [1]			
Bio 16	Precipitación de 1/4 anual más húmedo (mm)	8.95 [2]			
Bio 17	Precipitación de 1/4 anual más seco (mm)	9.11 [1]	*	*	*

* indica la distribución de la variable en el set.

3.5.- Selección de modelo

El mejor modelo se eligió de acuerdo a cinco criterios, 1) estadístico ROC parcial (Curva Operada por el Receptor) (Peterson *et al.*, 2008), 2) tasa de omisión (E = 5 %), 3) valor más

bajo del Criterio de Información de Aikaike (AICc) (Morales *et al.*, 2017), 4) curvas de respuesta de la especie a los gradientes ambientales (Merow *et al.*, 2013) y 5) significancia estadística del modelo, *p*-values (Elith y Leathwick, 2009).

La significación estadística se determinó mediante un remuestreo con los registros independientes. Así mismo en el paquete de 'kuenm' se implementaron las curvas de respuesta y las pruebas de Jackknife a variables bioclimáticas para determinar la contribución de la variable al modelo (Cobos *et al.*, 2019).

3.6.- Estratificación de los mapas de idoneidad

La idoneidad ambiental refleja las condiciones ambientales donde la especie está presente a través de cuantificar la relación entre las variables ambientales de los sitios con presencia confirmada de la especie (VanDerWal *et al.*, 2009). Los mapas de idoneidad actual y futura de *P. patula* se estratificaron en tres niveles (baja, media y alta), para ello, se distribuyeron aleatoriamente 5000 puntos sobre el área de calibración, a los cuales se les extrajo el valor de idoneidad del modelo y con ayuda del paquete 'stratifyR' de R, el cual opera acorde al método de Khan et al. (2015), que consiste en determinar los límites óptimos de cada estrato (OSB) y los tamaños óptimos de la muestra (OSS), utilizando una distribución de frecuencia y la asignación de Neyman para obtener la varianza máxima y mínima entre estratos.

3.7.- Estimación de la incertidumbre del modelo de nicho

Para obtener la incertidumbre de la predicción, del modelo seleccionado, se realizaron 10 repeticiones, de los cuales se calculó el promedio, desviación estándar y con ello, se obtuvo el coeficiente de variación en ambos RCP (4.5 y 8.5), además con esto se reduce el sesgo.

3.8.- Validación de la transferencia del modelo de nicho

Se utilizó la métrica MOP (paridad orientada a la movilidad), para evaluar el riesgo de extrapolación. El MOP ubica las áreas de extrapolación estricta y calcula la semejanza entre las regiones de calibración y proyección (Owens *et al.*, 2013). Cuando no existen valores climáticos fuera del área de calibración, se refiere a que no hay áreas con extrapolación

estricta (Alfaro-Ramírez *et al.*, 2020). Los mapas del MOP se realizaron para cada escenario RCP 4.5 y 8.5, promediando el MOP de cada MCG.

3.9.- Tipo de áreas idóneas identificadas al transferir el modelo de nicho

Se reclasificaron los mapas de idoneidad actual y futuro del modelo seleccionado de *P. patula* en 0 y 1; el valor de cero desde la idoneidad mínima hasta el límite inferior del segundo estrato, mientras que el valor de uno, correspondió al resto de la idoneidad. Concluida la reclasificación, se realizó álgebra de rasters (actual + modelo futuro + actual) que dio como resultado, 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 en la actualidad, pero no son idóneas 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.- El modelo de nicho de *P. patula*

Se obtuvieron en total 1 212 registros, de los cuales quedaron 267 al realizar el proceso de limpia, por lo tanto, se eliminó 78 % de los registros iniciales. Este es un buen número de registros para realizar la modelación ya que esta cantidad sobrepasa lo que establecen autores como Elith et al. (2006), quienes argumentan que para modelar nichos ecológicos se deben usar 30 registros de ocurrencia de la especie como mínimo. Por otra parte, Shcheglovitova et al. (2013), indican que es suficiente con 50 de presencia de la especie.

Aceves et al. (2018), Monterroso et al. (2012) y Van Zonneveld et al. (2009) modelaron la misma especie para, estado de Hidalgo, México y Centro América, pero con 130, 15 y 24 registros de presencia de la especie, respectivamente. Los autores obtuvieron resultados diferentes a los nuestros, ya que ellos encontraron superficies menores (4 718 y 718 km² acorde a los primeros dos autores) debido a que su estudio fue a una escala más pequeña. Por otra parte, Pérez et al. (2012), también estudiaron la distribución potencial *P. patula* con modelos de cambio climático para el Estado de México, pero con un método diferente de modelación que usó técnicas multicriterio y obtuvieron superficies más pequeñas (1 813 km²) de idoneidad actual y futura; que las encontradas en este estudio, estas diferencias en superficies son principalmente por la manera de modelar de los distintos métodos, así como selección de variables y distribución de los registros.

En el presente estudio, los estratos de idoneidad (varianza mínima intra-estrato y máxima inter-estrato) se definieron en tres intervalos: bajo (0.00 – 0.259), medio (0.259 – 0.482) y alto (0.482 – 0.838). Los valores bajos representan baja idoneidad climática para la especie, valores altos alta idoneidad climática. Se generaron 147 modelos candidatos, todos estadísticamente significativos ($p < 0.05$). El modelo seleccionado tuvo tres tipos de respuesta: lineal (l), cuadrática (q) y producto (p) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Número de modelos candidatos generados, estadísticos de ajuste y validación para la modelación de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Criterio/ Estadístico	Modelos (<i>n</i>)
Total de modelos candidatos (TmC)	147
Modelos estadísticamente significantes al 95 % (mES)	147
Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión (mTO)	17
Modelos que cumplen con el criterio AICc (mAIC)	2
n de mES y mTO	17
n de mES y mAIC	2
n de mES, mTO y mAIC	2
Modelo seleccionado	M_0.1_F_lqp(set3)
Estadísticos	Valor
Media AUC ratio	1.65
ROC parcial	0
Tasa de omisión >0.05 %	0.04
AICc	3622.25
delta AICc	0
Núm. parámetros	17

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.

4.2.- Mejores predictores

Las variables que predicen mejor la distribución de *P. patula* fueron las del set 3: Bio 5 (Temperatura máxima del mes más cálido °C), Bio 6 (Temperatura mínima del mes más frío °C), Bio 7 (Intervalo de temperatura anual), Bio 13 (Precipitación del mes más húmedo mm) y Bio 17 (Precipitación de 1/4 anual más seco mm), con 56.04, 16.34, 9.32, 7.42 y 10.84 % de contribución, respectivamente (Cuadro 3). De acuerdo a las curvas de respuesta, la no extrapolación fue el tipo de respuesta que dio mejores predicciones. El modelo seleccionado para predecir la distribución de *P. patula* obtuvo un valor de ROC parcial de 1.65 (Cuadro

2), teniendo una buena predicción de las áreas idóneas de esta especie, ya que Peterson et al. (2007) indican que modelos con valor de ROC parcial mayor a 1 son predicciones buenas que se deben al modelo y no al azar.

Cuadro 3. Contribución e importancia de permutación de las variables climáticas utilizadas para modelar la distribución actual y futura de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

	Contribución porcentual		Importancia de la permutación	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Bio 5	56.04	5.13	40.78	27.80
Bio 6	16.34	3.91	28.26	22.37
Bio 7	9.32	1.14	12.28	7.91
Bio 13	7.42	2.25	3.66	2.36
Bio 17	10.84	2.36	15.04	5.11

En el presente estudio se hizo la modelación de *P. patula*, con solo 5 variables bioclimáticas, acorde a Franklin et al. (2009), Cruz et al. (2014) y De Marco et al. (2018), señalan que el uso de múltiples variables en la modelación causa problemas de sesgo e incertidumbre en las predicciones aunado a una disminución del poder estadístico, pero Méndez et al. (2021) mencionan que pocas variables podrían significar alta vulnerabilidad de la especie al cambio climático, ya que con la modificación de alguna variable debida al cambio climático, podría alterar la distribución de la especie.

Otra de las razones por las cuales no es recomendable modelar con gran número de predictores es porque los autores Elith et al. (2006) y Mendoza et al. (2011), argumentan que al utilizar un gran número de predictores provocan problemas de colinealidad. Cruz et al. (2014) mencionan que se extiende la varianza de las variables y de los parámetros de respuesta. Peterson et al. (2011) concluyen que, con todo ello, que se crea la representación errónea de la distribución de especies. Además, Phillips et al. (2004) argumentan que los modelos complejos creados a partir de gran cantidad de parámetros tienden a sobreestimar las predicciones.

Debido a la amplia distribución de *P. patula*, en este estudio se utilizaron únicamente variables climáticas, descartando las variables estáticas como suelo, pendiente, exposición y altitud, ya que estas no determinan la vulnerabilidad de la especie tal y como lo dice Radosavljevic et al. (2014).

En cuanto a los registros, 75 % fueron usados para entrenamiento y 25 % para validación. Aceves et al. (2018), al estudiar la distribución potencial de 20 especies de *Pinus*, encontraron que en *P. patula* las tres variables que más contribuyen en el modelo son Bio 10 (36.5 %), Bio 7 (13.3 %) y Bio 5 (12.3 %), lo que demuestra que dos de esas tres variables (Bio 7 y Bio 5) también fueron las de mayor contribución en el presente estudio. En esta misma especie, Monterroso et al. (2012) encontraron que las variables que determinaron el establecimiento de *P. patula* fueron: precipitación, existencia de bosque mesófilo, tipo de suelo y sistema de topofomas (no presentan %).

Por su parte, Manzanilla et al. (2019) generaron y probaron 10 modelos de distribución, por lo que para determinar el modelo que mejor explicó la distribución actual de la especie *Pinus hartwegii* Lindl realizaron las pruebas estadísticas del área bajo la curva (ABC), ROC parcial y prueba de Z, eligiendo el modelo con mejor ajuste (> 0.9). También encontraron que para ambos periodos (actual y futuro), las variables determinantes fueron la temperatura promedio anual (Bio1) con 35 % de contribución para el periodo actual y 60 % para el futuro, en la distribución actual del bosque subalpino de *P. hartwegii* en el Eje Neovolcánico Transversal.

García et al. (2018), encontraron resultados similares a los nuestros con la Bio 5 porque fue la segunda variable de mayor aportación al modelo hecho para *Pinus cembroides* Zucc. con una contribución de 11.6 %. También Cruz et al. (2016), evaluaron el impacto del cambio climático sobre la distribución potencial de 12 especies de la familia Pinaceae (10 pinos y 2 abetos) en el estado de Michoacán, donde las variables más importantes fueron Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 17, mismas que se usaron para modelar la distribución potencial actual y futura de *P. patula*. Van Zonneveld et al. (2009) encontraron que para *P. patula* y *Pinus tecunumanii* Schwerdtf. ex Eguluz & Perry, en México y Centroamérica, la temperatura máxima del mes más cálido (Bio 5) es la variable climática que mejor define el hábitat de *P. Patula*, junto con el rango anual de temperatura (Bio 7), al igual que resultó en el presente estudio.

Alba et al, (2003) para encontrar los determinantes de la distribución de *Pinus* spp. en la altiplanicie de Chiapas México, crearon variables climáticas a partir de datos de estaciones meteorológicas de la región y observaron que la variable de cantidad de lluvia en la época húmeda y seca, junto con la variable de temperaturas máximas y mínimas, son las que más explican la distribución del genero *Pinus* en esa región, esto indica que las variables se pueden construir con datos de temperatura y precipitación.

4.3.- Espacio ambiental y geográfico de *P. patula*

En el espacio ambiental de la especie de *P. patula* (Figura 1a), se aprecia que el denominado nicho fundamental (Soberón y Peterson, 2005), es muy amplio, variando desde 7 hasta 22 °C, mientras que la precipitación (Bio 12) va de 200 hasta 2500 mm (Figura 2), similar al establecido por Wormald (1975) el cual va de entre 12 y 18 °C y entre 600 y 2 500 mm. La mayoría de los registros de la especie se concentran en el centro del nicho fundamental; es decir, que el nicho realizado (Soberón y Peterson, 2005), indica que *P. patula* prefiere establecerse en lugares con temperatura de 15 °C y precipitación de 1200 mm.

En el espacio geográfico (Figura 1b), se observa que la especie posee un rango latitudinal amplio (de 16 a 25° de latitud norte) pero muy estrecho distribución longitudinal (de 92 a 103° de longitud oeste).

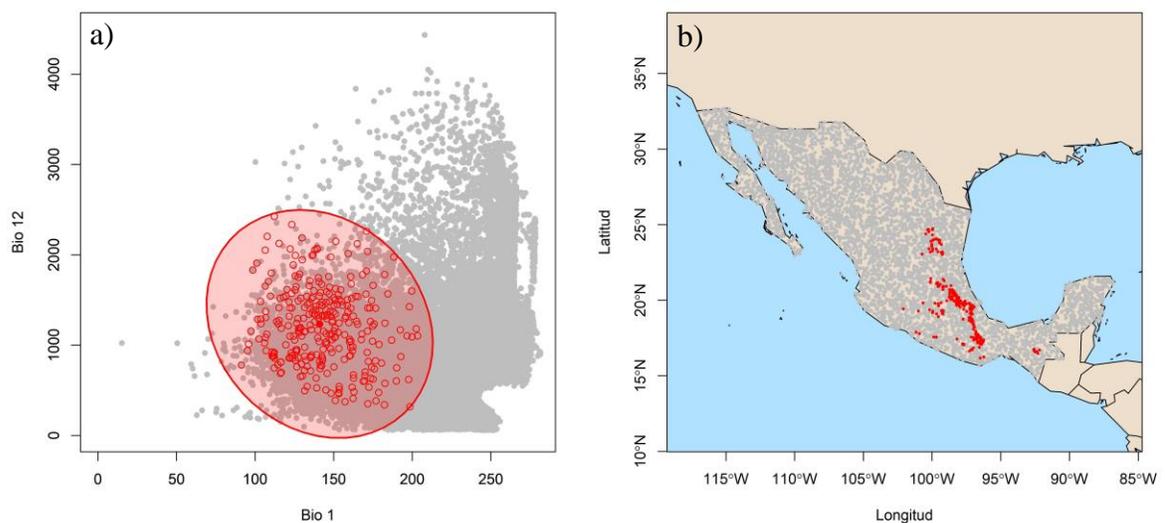


Figura 1. Nicho fundamental y realizado de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el espacio ambiental elaborado con Bio 1 (Temperatura, °Cx10) y Bio 12 (Precipitación, mm) (a), y espacio geográfico (b). Círculos en rojo corresponden a los registros de la especie y círculos en gris son los valores de Bio 12 y Bio 1 en México.

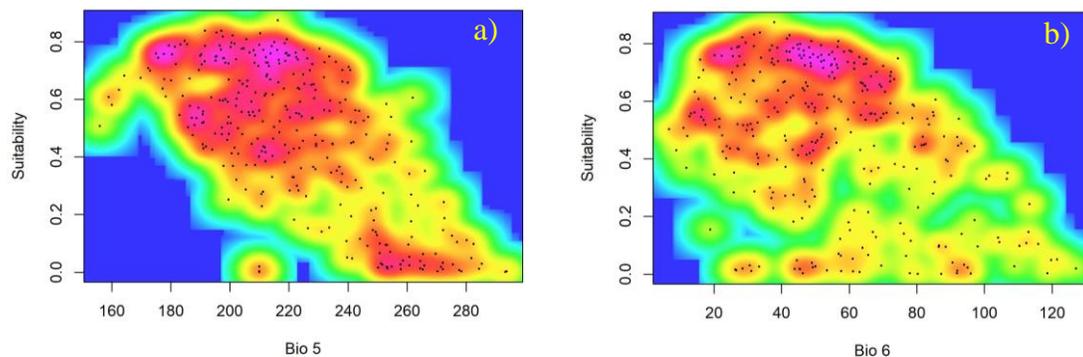
4.4.- Respuesta de las variables ambientales

En la Figura 2a la variable Bio 5, que es la que más contribuyó a la distribución (56.04 %) de *P. patula*, muestra una distribución sesgada hacia la derecha, lo que indica que la variable fue adecuadamente elegida; también existe una tendencia negativa con dicha variable.

La preferencia de la especie está entre 17 y 24 °C (Bio 5), y en este mismo rango de temperatura, la idoneidad es más alta (0.4 a 0.9); la tolerancia de la especie está de los 15 °C hasta los 29 °C. Esta misma figura (Figura 2a) muestra que, por ser la variable de mayor contribución, los puntos están concentrados en una misma zona, a diferencia de las demás variables de menos contribución ya que muestran puntos más dispersos.

En cuanto a la Bio 6 (Figura 2b), que es la segunda de mayor contribución (16.34 %), muestra una tendencia negativa de idoneidad porque la preferencia de la especie va de 1 a 7 °C; en estos valores se encuentran la idoneidad más alta (0.4 y 0.9) y el rango de tolerancia de la especie (1 a 13 °C). La Bio 13, Bio 17 y Bio 12, (Figura 2d, 2e y 2f) muestran un sesgo a la izquierda, mientras que la Bio 7 y Bio 1 (Figura 2c y 2g) están sesgadas a la derecha.

La idoneidad, presenta una relación positiva con los valores de precipitación anual (Figura 2f), y una relación negativa con los valores de temperatura media anual (Figura 2g).



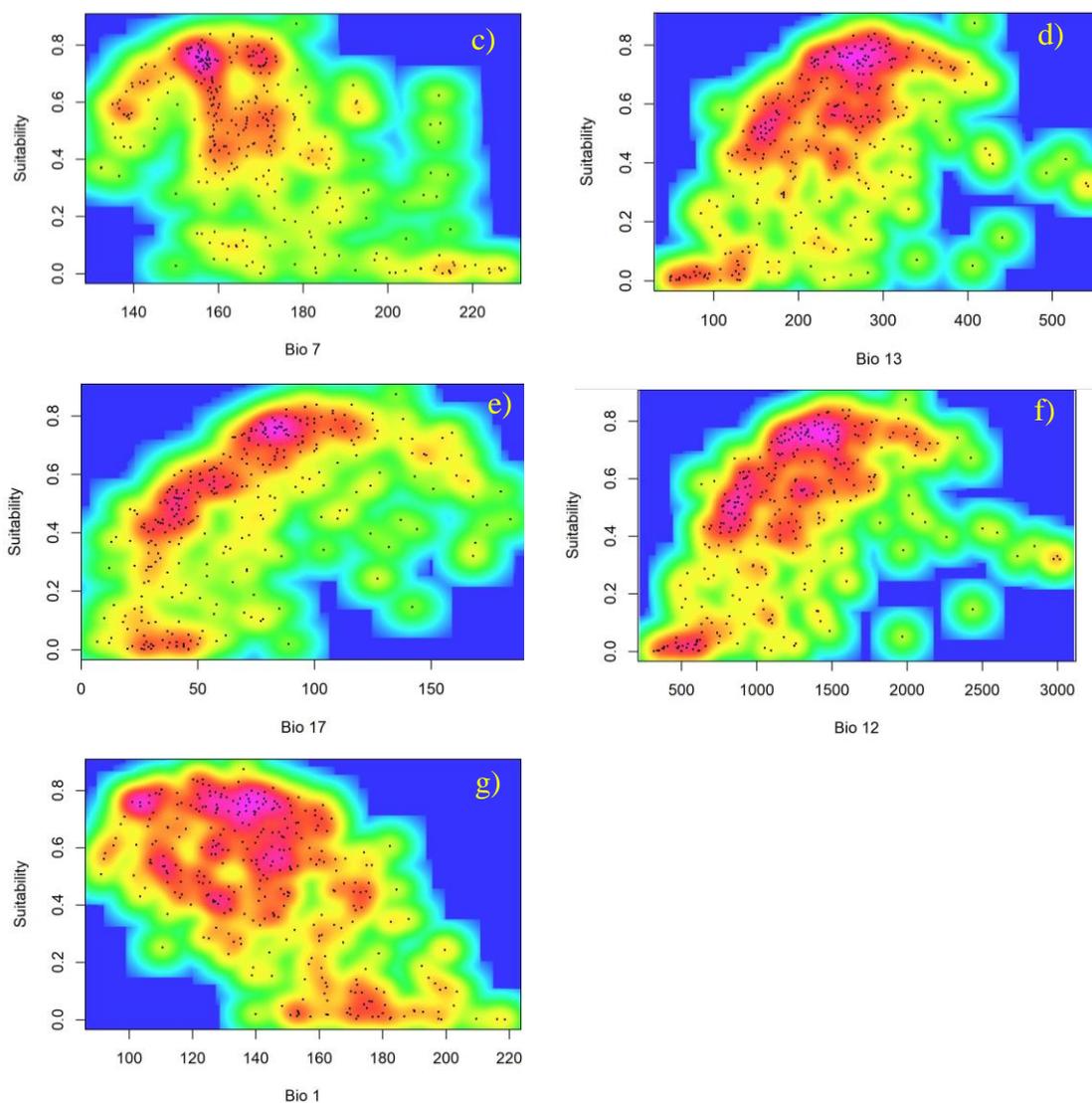


Figura 2. Respuestas de las variables bioclimáticas de acuerdo a la idoneidad actual estimada para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

4.5.- Idoneidad actual y futura en el área de calibración

En el mapa de distribución actual de *P. patula* (Figura 3) y el área de calibración (M), la idoneidad baja es la de mayor superficie con 535 104.6 km² (90.58 %), seguida de la idoneidad media con 34 293 km² (5.8 %) y por la idoneidad alta con 21 358 km² (3.6 %).

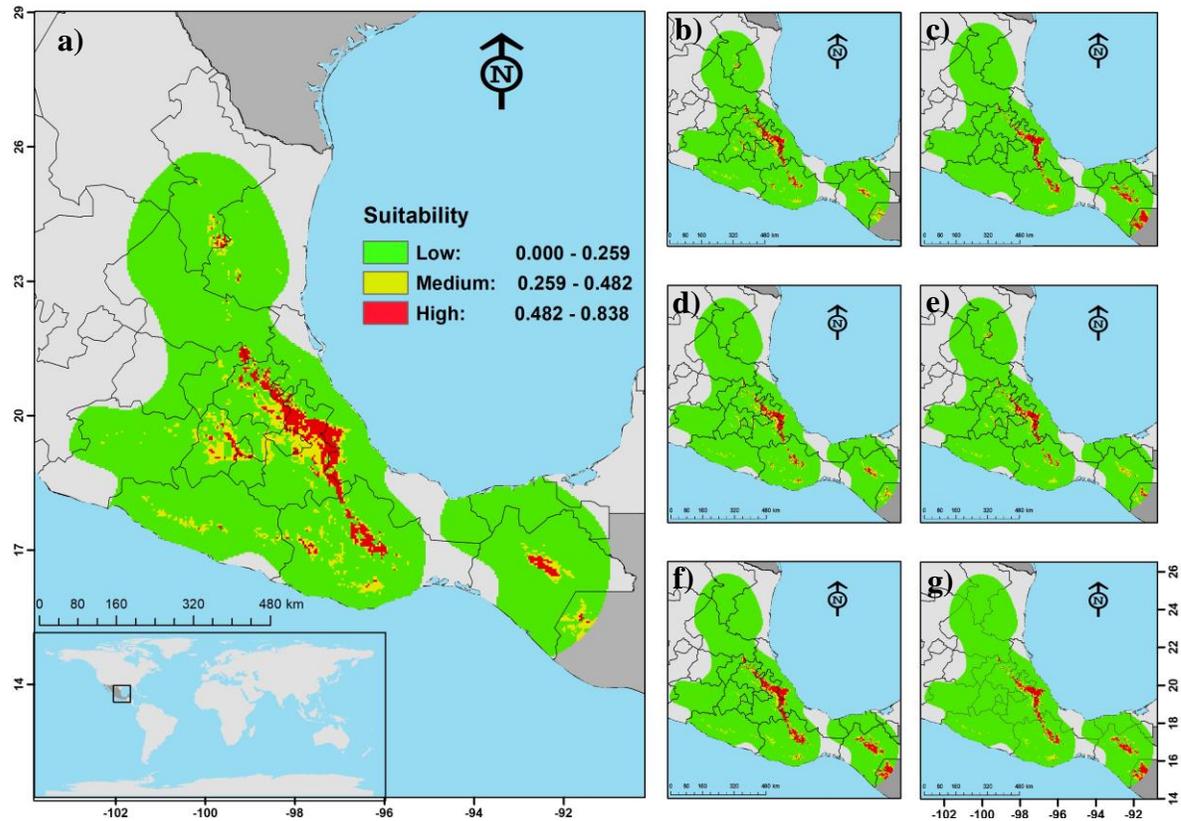


Figura 3. Idoneidad actual (a) y futura al 2050 (b - g) en el área de calibración estimada a través de máxima entropía para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., empleando tres modelos de circulación general, CCSM4 (b-c) HADGENM (d-e) y MIROC5 (f-g) en dos trayectorias de concentración de CO₂ RCP 4.5 (b, d y f) y 8.5 (c, e y g).

En la gráfica de superficie de estrato de idoneidad por estado (Figura 4), se puede apreciar que la idoneidad alta se encuentra principalmente en cinco estados: Puebla (31 %), Oaxaca (18 %), Veracruz (17 %), Hidalgo (12 %) y Chiapas (7 %). En la modelación a futuro, la superficie de idoneidad alta es mayor que la superficie de idoneidad media para el modelo MIROC5 con ambas RCP, y para el modelo CCSM4 con RCP 8.5. Aceves et al. (2018), encontraron una superficie de 4 718 km² de idoneidad climática alta (> 0.7) para *P. patula*, que es menor a la encontrada en nuestro estudio (21 175 km²), para México. Esta superficie está principalmente en los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz, como lo fue en el presente estudio, además del estado de Chiapas; en su conjunto fueron los de mayor superficie de alta idoneidad climática actual. Esta diferencia en superficie es probablemente por factores como

la mejor selección de variables, limpia, cantidad de registros y el tamaño del área de estudio, que se implementaron en este estudio.

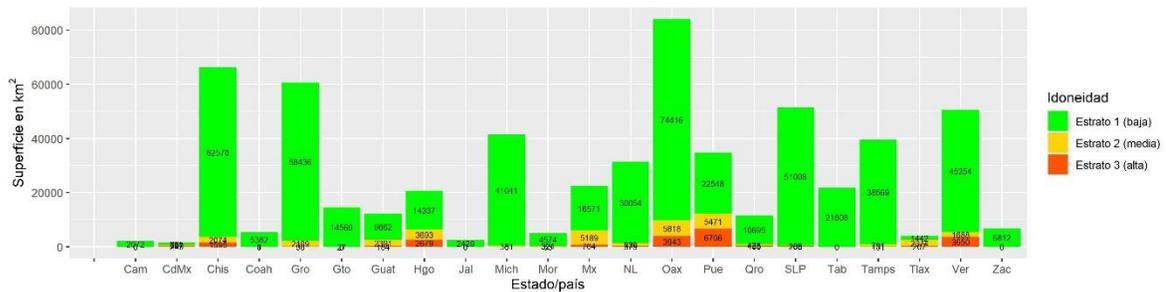


Figura 4. Superficie por estrato de idoneidad climática actual en el área de calibración para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Monterroso et al. (2012) encontraron que para la especie de *P. patula* existen 718 km² para el estado de Hidalgo, en condiciones actuales. En cuanto a escenarios de cambio climático concuerdan en que la superficie será de 425.6 km²; es decir, los modelos sugieren que la superficie en condiciones óptimas disminuirá casi 300 km², mientras que la superficie sin aptitud aumentará. En nuestro estudio, la superficie de idoneidad actual para el estado de Hidalgo es de 2 678 km² que es 3.7 veces mayor. Esto probablemente porque en su estudio solo tomaron 15 registros dentro de una parte de Hidalgo, en la que se encuentra el bosque mesófilo de montaña, además utilizaron Biomapper —que es un programa usado para modelar usando algoritmos diferentes al de esta investigación— y también por la diferente forma de seleccionar las variables. En cuanto a la superficie de modelación al futuro se concuerda que en promedio con los tres modelos y los dos tipos de concentraciones de CO₂ el área de idoneidad alta disminuirá y la superficie de idoneidad baja aumentará.

Por otra parte, Pérez et al. (2012) estudiaron escenarios de distribución de *P. patula* en el Estado de México y obtuvieron que la especie presenta una aptitud alta de 1 813 km² (equivalente a 64.11 % de la superficie forestal de coníferas de la entidad) y una media de 2 733 km² (equivalente a 96.66 %). Los autores concluyeron que la extensión de la aptitud media es más amplia que la alta, y esta se encuentra el sur de la entidad. En comparación a este estudio se encontró una superficie menor para el Estado de México con 763 km² de idoneidad alta, y una superficie mayor de idoneidad media con 5 188 km², probablemente

estas diferencias son porque se utilizaron como variables climáticas solo la precipitación media anual y la temperatura promedio, además utilizaron variables edafológicas y topográficas.

4.6.- Tasa de cambio de idoneidad climática actual con respecto al 2050

En la modelación a futuro, la superficie de idoneidad alta fue mayor (0.27 veces más en promedio) que la superficie de idoneidad media para el modelo MIROC5 con ambas RCP, y para el modelo CCSM4 con RCP 8.5. En promedio, en los tres modelos hubo más de 700 km² de idoneidad climática alta con el RCP 4.5 que con el 8.5.

Según el modelo de nicho, al 2050 los tres modelos (CCSM4, HADGENM y MIROC5) y en ambos RCP's (4.5 y 8.5) (Cuadro 4), la superficie de idoneidad baja podría aumentar entre 3.12 y 5.39 %; la idoneidad media podría disminuir entre 38.07 y 61.96 %, mientras que la idoneidad alta en el modelo MIROC5 con RCP 4.5 predice un aumento de 7.6 %, para los demás modelos con ambas RCP, la superficie disminuye entre 16.18 y 50.59 % respectivamente. La tasa de cambio más alta (-64 %) es para la idoneidad media para el modelo CCSM4 con RCP 4.5, en cuanto a la tasa de cambio más baja, es para la idoneidad baja en el modelo MIROC5 con RCP 4.5.

La idoneidad climática alta (promedio de los tres modelos) tiene mayor tasa de cambio en el RCP 4.5 que el 8.5; y para la idoneidad media es mayor el cambio en el RCP 8.5 que el 4.5.

Cuadro 4. Tasa de cambio de la superficie de idoneidad actual con respecto a las estimaciones para el año 2050 para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., utilizando el modelo de nicho con las proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general.

	Baja (<0.259)	Media (0.259-0.482)	Alta (>0.482)	Total
Idoneidad actual (km ²)	535 104.67	34 293.03	21 358.49	59 0756.19
MIROC5 RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	551 779.58	16 709.83	22 984.91	591 474.32
Tasa de cambio (%)	3.12	-51.27	7.61	
MIROC5 RCP 8.5				

Idoneidad al 2050 (km ²)	561 139.11	13 043.87	17 291.59	591 474.57
Tasa de cambio (%)	4.87	-61.96	-19.04	
CCSM4 RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	556 752.36	21 236.15	13 335.34	591 323.86
Tasa de cambio (%)	4.05	-38.07	-37.56	
CCSM4 RCP 8.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	561 394.62	12 177.68	17 902.60	591 474.91
Tasa de cambio (%)	4.91	-64.49	-16.18	
HadGENM2-AO RCP 4.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	563 573.79	16 174.05	11 579.78	591 327.62
Tasa de cambio (%)	5.32	-52.84	-45.78	
HadGENM2-AO RCP 8.5				
Idoneidad al 2050 (km ²)	563 942.95	16 825.56	10 553.55	591 322.06
Tasa de cambio (%)	5.39	-50.94	-50.59	

4.7.- Incertidumbre del modelo de nicho y transferencia del modelo

En la Figura 5, se puede ver que los valores del coeficiente de variación van de 0.73 a 199 %. En el área de calibración los rangos de valores son similares (de 4 a 110 %) para los dos tipos de RCP (4.5 y 8.5). En cuanto a la incertidumbre observada por estratos de idoneidad, los valores de CV son diferentes, debido a que, para el estrato de idoneidad alta, los valores de CV van de 1 a 12 %, en el estrato de idoneidad media los valores van de 15 a 30 % y para el estrato de baja idoneidad los valores van de 10 a 110 %, esto en ambos RCP's.

En cuanto a la paridad orientada a la movilidad, que identifica áreas de extrapolación estricta y calcula la similitud ambiental entre el área de calibración (M) y proyección, algunas áreas de alto valor de MOP (> 0.7) se traslapan con bajos valores de CV (< 20). Esto indica que son áreas con similitud climática aceptable para la especie de *P. patula*.

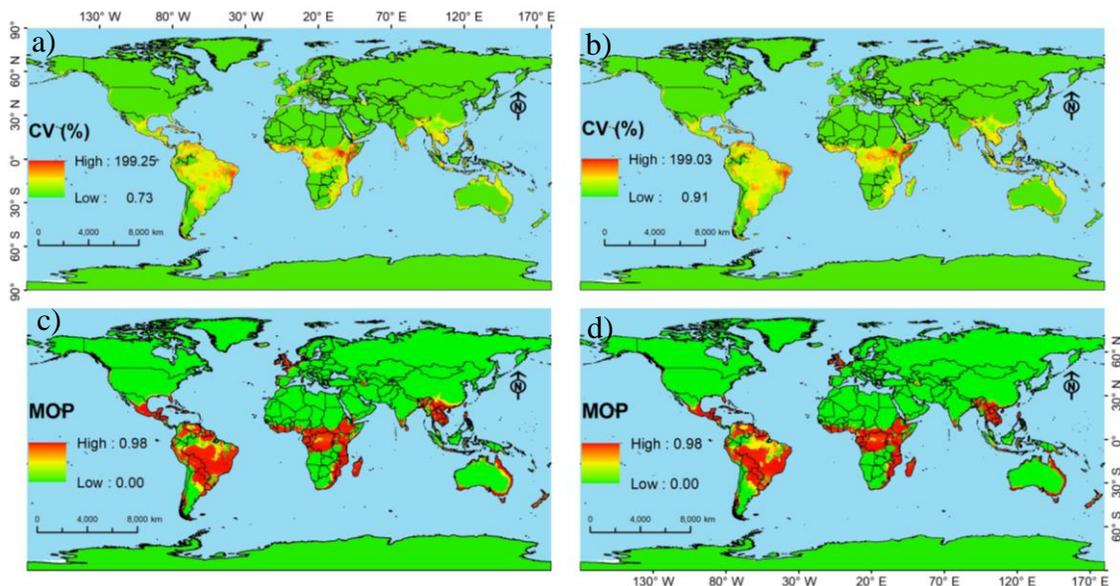


Figura 5. Incertidumbre promedio (coeficiente de variación) de las predicciones de idoneidad climática de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general (MCG) en los RCP 4.5 (a) y 8.5 (b) al 2050. Paridad Orientada a la Movilidad (MOP), promedio de tres MCG, en el RCP 4.5 (c) y 8.5 (d).

Escobar (1967) y Wormald (1975) señalan que *P. patula*, es la especie más utilizada en los trópicos y subtropicos, por tanto, se ha establecido en países como: Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y Venezuela, el continente americano. En África en países como: Malawi, Kenia, Tanzania, Uganda, Etiopía, Ruanda, Burundi, Camerún, Nigeria y Congo, e incluso en Nueva Zelanda y Australia en el continente de Oceanía. El presente estudio muestra idoneidad actual baja (0 a 0.3) fuera de M, para los países de dos continentes (América y África), mientras que los países del continente Oceanía (Australia y Nueva Zelanda) cuentan con áreas de idoneidad actual alta (hasta 0.9).

4.8.- Nuevas áreas idóneas y áreas de alto y bajo impacto

En la Figura 6, se muestran las áreas de idoneidad estimadas para la especie *P. patula*, resultantes de la modelación. Se puede apreciar que en el promedio de los tres modelos con el RCP 4.5 (Figura 6a), las nuevas áreas idóneas dentro del área de calibración tienen una

superficie de 3 522 km², las áreas de bajo impacto tienen una extensión de 3 1961 km² y las áreas de alto impacto 23 914 km².

El promedio los tres modelos con RCP 8.5 (Figura 6c), arrojan una superficie de áreas de alto impacto 32 070 km², para las áreas de bajo impacto de 24 526 km², y en cuanto a las nuevas áreas idóneas se tiene 6 112 km², que es casi el doble de superficie que con el RCP 4.5, y además estas nuevas áreas de idoneidad se encuentran principalmente en el país de Guatemala (2 481 km²), siguiendo el estado de Chiapas (1 997 km²), Oaxaca (815 km²), Veracruz (537 km²) y Puebla (257 km²), estas áreas son validadas por el MOP (valores > 0.9) y por el CV (valores < 0.5).

Las nuevas áreas idóneas a nivel global y en promedio de los tres modelos, tienen mayor superficie en el RCP 8.5 (Figura 6b) (1 869 931 km²), que con el RCP 4.5 (1 186 085 km²) (Figura 6d). Más de la mitad de estas superficies (1 000 000 km² aprox. en cada modelo) son validadas por el MOP (> 0.9) y el CV (< 0.5), y se encuentran principalmente en Colombia, Guatemala, Ecuador, Venezuela y Perú. En general, para la especie de *P. patula*, el promedio de los tres modelos, y consideradas a partir del segundo estrato de idoneidad (0.259), las áreas idóneas se reducen más (14 %) para el RCP 8.5 que para el RCP 4.5 (Figura 6a y 6c).

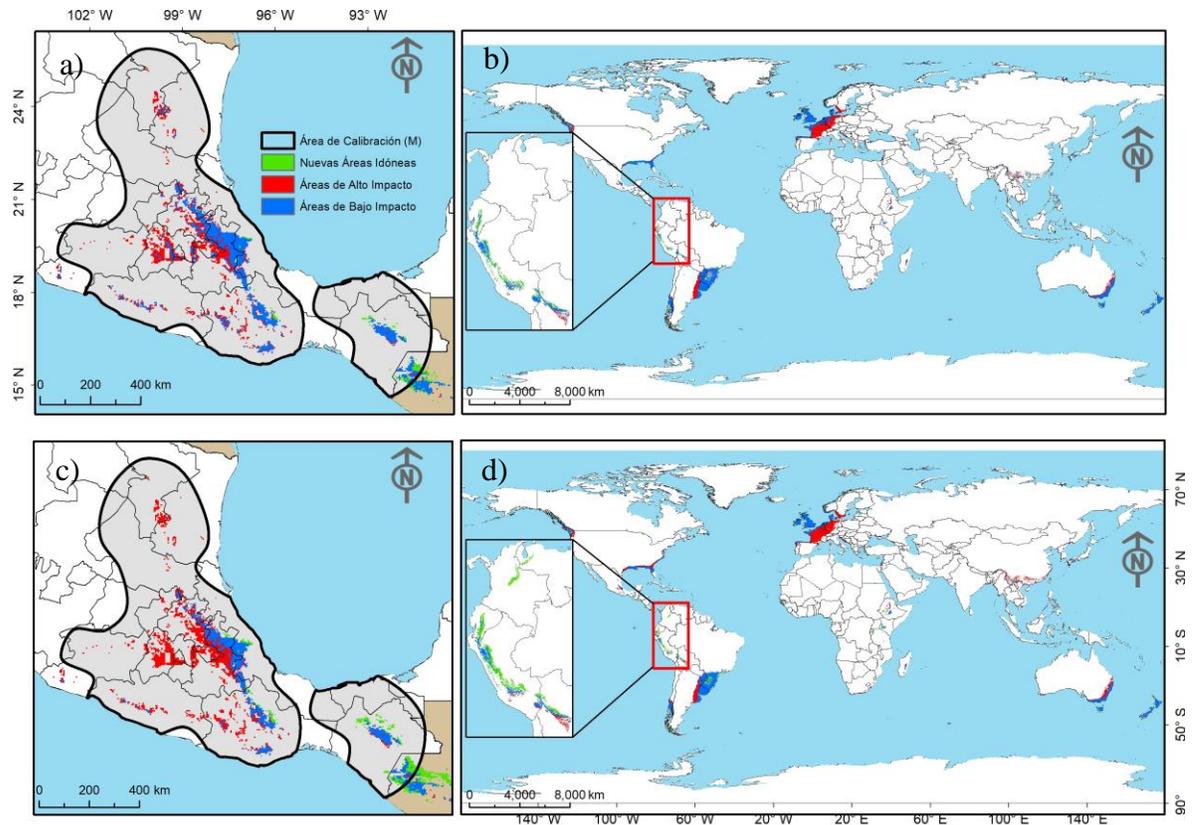


Figura 6. Clasificación de áreas de idoneidad estimadas para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el área de calibración, M (a y c) y en todo el mundo (b y d), promedio de tres Modelos de Circulación General (CCSM4, HADGENM y MIROC5), con un RCP de 4.5 (a y b) y RCP de 8.5 (c y d).

Cruz et al. (2016) al igual que nosotros, concluyen que los modelos de distribución de especies —en un escenario de emisiones altas (RCP 8.5)— presentarán mayor reducción de áreas idóneas, en comparación con los escenarios de emisiones bajas (RCP 4.5) para 12 especies de la familia Pinaceae (10 pinos y 2 abetos) en el estado de Michoacán. Pérez et al. (2012) concluyen, como en este estudio, que la distribución potencial de *P. patula* tiende a reducirse de manera importante de un 41 a 85 % en el Estado de México con escenarios de cambio climático. Del Castillo et al., (2020) sugieren que *P. patula* es sensible al cambio climático ya que en el futuro se modificará el área de distribución, se disminuirá el tamaño poblacional, la superficie habitable y además tendrá desplazamientos hacia altitudes más altas.

Esta conclusión es diferente a la de este trabajo porque las áreas idóneas al futuro para *P. patula*, se encuentran a altitudes más bajas (Figura 7b), aunque actualmente la idoneidad climática más alta ocurre a mayores altitudes (Figura 7a). Esta diferencia probablemente se debe a que su trabajo se basó en el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y los rasgos anatómicos foliares, donde a mayores elevaciones encuentran mejores condiciones fisiológicas de la especie que en altitudes bajas.

Van Zonneveld et al. (2009) también concuerdan con el presente estudio ya que las áreas actuales (adecuadas para el establecimiento de *P. patula*) disminuyen significativamente en el futuro (proyecciones al año 2050) en un 39 % el modelo CCCMA y 36 % con el modelo HADCM3, ambos modelos con el escenario de emisiones A2a.

Martínez et al. (2020) tienen resultados diferentes en cuanto a la modelación futura de *Pinus greggii* Engelm., ya que con dos modelos (CNRM-CM5 y HadGEM2-ES) el área idónea futura se reducirá (7.8 a 21.8 %) más con un RCP 4.5 que con el RCP 8.5.

En el cuadro 5 se puede ver que el modelo MIROC5 con ambas RCP (4.5 y 8.5) predice mayor cantidad de superficie de NAI (más de 2 millones de km²) que los otros modelos, mientras que el modelo HadGEM2-AO, en promedio de las dos RCP (4.5 y 8.5) predice menos superficie de NAI (873 129 km²).

Cuadro 5. Clasificación de áreas de idoneidad de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., a nivel global al 2050, predichas a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos vías de concentración representativas, RCP's 4.5 y 8.5.

Modelos de Circulación	Nuevas Áreas Idóneas (km ²)	Áreas de Alto Impacto (km ²)	Áreas de Bajo Impacto (km ²)	Superficie Total (km ²)
CCSM4 RCP 4.5	730 041.90	2 799 972.89	9 049 497.57	12 579 512.35
CCSM4 RCP 8.5	2 486 145.65	4 242 741.41	7 634 841.77	14 363 728.83
HadGEM2-AO RCP 4.5	782 814.30	3 907 951.39	7 938 094.13	12 628 859.82
HadGEM2-AO RCP 8.5	963 443.32	3 256 254.59	8 589 304.96	12 809 002.86
MIROC5 RCP 4.5	2 045 399.93	3 691 877.53	8 151 311.01	13 888 588.47

Se puede observar en la Figura 7a que la idoneidad climática de la especie de *P. patula* actual es positiva con la altitud e inversa con la latitud. También se puede apreciar en la Figura 7b que la altitud mediana (2 500 m) de las áreas de alto impacto (las que ya no serán idóneas en el futuro) es ligeramente más alta que las áreas de bajo impacto (100 m).

En general la altitud va de 1 400 a 3 200 m para las áreas de alto y bajo impacto. La altitud de las nuevas áreas idóneas es más extensa, va de 500 a 3 200 m, pero la mayoría de los datos de altitud se concentran de 1 200 a 1 900 m. Esto quiere decir que la idoneidad de *P. patula*, actualmente, se encuentra en altitudes mayores, en áreas más hacia el trópico que en áreas que se encuentran más al norte (Figura 7a); también se estima que esta especie podría ir hacia bajas altitudes en el futuro y se podría perder la idoneidad actual en altitudes mayores, ya que la mayor idoneidad actual se encuentra en las mayores altitudes (> 2500 m) del rango de distribución natural de la especie (Figura 7a), y al futuro la mayor idoneidad se encontrará a altitudes menores (< 1800 m).

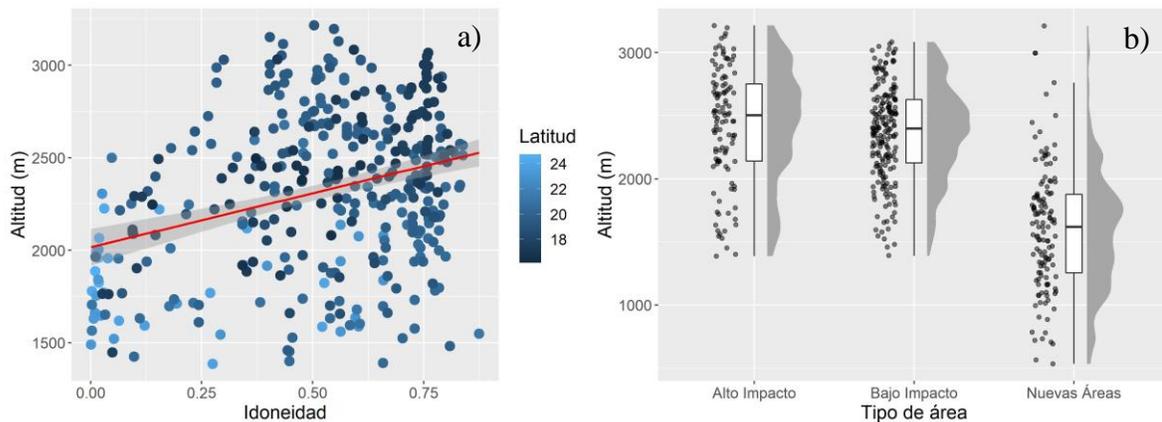


Figura 7. Relación de idoneidad con altitud (a) y distribución altitudinal para cada tipo de área predicha (b) para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Del Castillo et al. (2020) obtuvieron en su estudio de indicadores de sensibilidad al cambio climático en *P. patula* (usando NDVI) que esta especie es sensible a la altitud ya que los sitios de mayor elevación son más favorables que los de menos elevación. Esto tiene relación con lo encontrado en el presente estudio ya que a mayor altitud se halló mayor idoneidad.

Viveros et al. (2013) también reportaron relación positiva entre la altitud y las condiciones morfológicas de *P. patula*, donde obtienen como resultado que, a mayores altitudes, los individuos presentaron conos más gruesos, las escamas con quillas más anchas y fascículos con vainas más largas.

Reynoso et al. (2018) utilizaron 25 variables bioclimáticas, topográficas y edafológicas para modelar las áreas potenciales de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *P. pseudostrobus*, y obtuvieron que la altitud es la variable de mayor aportación al modelo. Al respecto, en el presente trabajo, aunque no se utilizó la variable de altitud, también tiene relación con la idoneidad actual de *P. patula*. Méndez et al. (2021) encontraron que para tres especies de *Pinus* (*P. devoniana* Lindley, *P. leiophylla* Schl. & Cham. y *P. teocote* Schiede ex Schltdl.) la idoneidad es positiva con la altitud, argumentando que este efecto probablemente es debido a regímenes de mayor humedad y temperaturas más bajas.

La Bio 5, variable de mayor contribución (Figura 8a) muestra que el aumento de temperatura al futuro será más notorio en áreas de mayor latitud y en elevaciones bajas, con un promedio de 1.8 °C; para áreas con elevaciones altas y latitudes menores, el cambio será menor (1.6 °C). Para la Bio 6, segunda variable de mayor contribución (Figura 8b), la temperatura disminuirá en promedio 1.45 °C tanto en altitudes bajas como altas, en cuanto a la latitud aquí no se observó alguna tendencia.

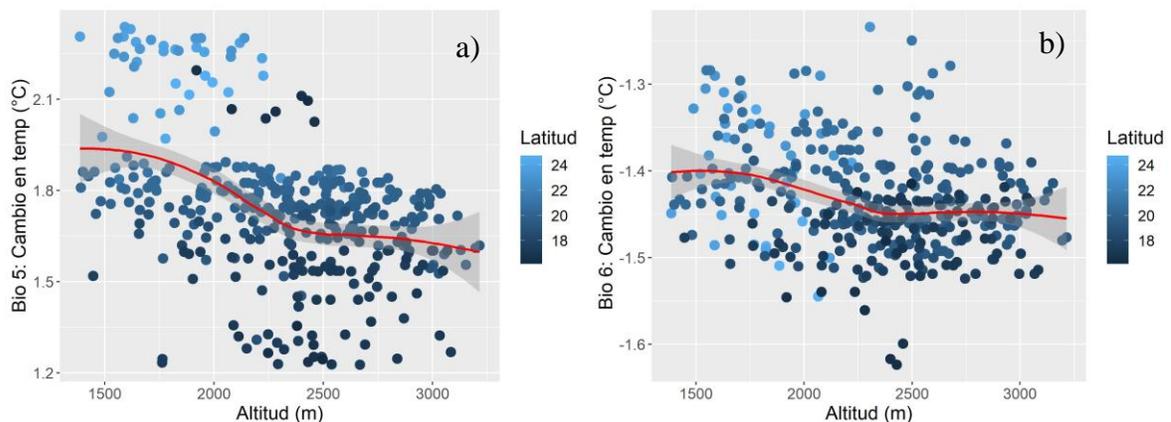


Figura 8. Cambios en temperatura esperados al 2050, sobre el área de distribución actual de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. promedio de tres MCG, relacionados a la altitud y latitud, en dos variables de mayor contribución, Bio 5 (a) y Bio 6 (b).

4.9.- Perfil bioclimático de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham

El perfil bioclimático de la especie permite apreciar la sensibilidad de la especie a las variables que lo determinan y de esta forma observar los efectos que tendrá la especie en el futuro a causa de la modificación de las variables y con ello predecir los cambios en distribución.

De las variables que más contribuyen a la modelación de la especie, Bio 5 tendrá un aumento de 1.7 °C (RCP 4.5) y de 2.1 °C (RCP 8.5), Bio 6 podría disminuir 1.2 °C (RCP 4.5) y 1.4 °C (RCP 8.5), Bio 7 aumentaría 3 °C (RCP 4.5) y 3.6 °C (RCP 8.5), Bio 13 aumentaría 29 mm (RCP 4.5) y disminuiría 4 mm (RCP 8.5), y por último Bio17 aumentaría 2 mm (RCP 4.5) y disminuiría 14 mm (RCP 8.5). Manzanilla et al. (2019) encontraron resultados similares en cuanto a cambios de temperatura, donde destacan que los escenarios de cambio climático produjeron un aumento en temperatura promedio anual (entre 0.7 y 2.1 °C) y reducciones de 11.7 % a 26.9 % en el nicho subalpino de *P. hartwegii*, siendo el nevado de Toluca y el pico de Orizaba los sitios más susceptibles al cambio climático; mientras que el parque Izta-Popo presentaría un aumento de nicho de 37.4 %.

En cuanto al perfil bioclimático de las áreas de bajo impacto, que es donde se encuentra la idoneidad actual y también se encontrara en el futuro, la Bio 5 tendrá un aumento de temperatura de 0.38 °C (RCP 4.5) y 0.67 °C (RCP 8.5), la Bio 6 disminuirá 1.5 °C (RCP 4.5) y 1.7 °C (RCP 8.5), la Bio 7 aumentará 1.8 °C (RCP 4.5) y 2.4 °C (RCP 8.5), la Bio 13 aumentará 75 mm (RCP 4.5) y 33 mm (RCP 8.5) y finalmente la Bio 17 aumentara 26 mm (RCP 4.5) y 5 mm (RCP 8.5).

Por otra parte, Martínez et al. (2020) también concluyen que la temperatura media anual aumentará de 0.7 a 2.1 °C en el área de distribución actual de *P. greggii*, para el periodo 2041 a 2060.

Cuadro 6. Contribución relativa de las variables al modelo de idoneidad de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., acorde a la prueba de Jackknife y perfil bioclimático detallado actual y futuro.

		n	Media	IC (media)	0.05	0.1	0.25	Mediana	0.75	0.9	0.95	Rango	DE	Vcoef	DMA	RIQ
Var.	Contrib.	Perfil bioclimático actual														
Bio 5	56.04	400	219.52	± 2.85	177.65	185.44	198.97	215.54	238.08	260.76	272.13	170.66	29.07	0.13	27.67	39.11
Bio 6	16.34	400	51.78	± 2.53	15.95	22.28	33.11	49.02	66.43	87.32	997.07	168.53	25.69	0.5	24.58	33.32
Bio 7	9.32	400	167.75	± 2.03	137.73	143.27	156.03	164.41	174.34	194.97	212.04	123.51	20.71	0.12	13.18	18.31
Bio 13	7.42	400	240.12	± 8.78	97.85	129.9	177	243.5	286	332	385	543	89.34	0.37	76.35	109
Bio 17	10.84	400	74.25	± 3.89	25.9	29	42	71	95	127.1	155	235	39.58	0.53	40.77	53
Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 4.5 Áreas de Bajo Impacto																
Bio 5	56.04	206	223.27	± 2.94	191	193	208	224.5	238.75	252.5	258	108	21.39	0.1	22.98	30.75
Bio 6	16.34	206	36.69	± 2.67	5.75	11	22	36	50.75	60.5	72.75	88	19.45	0.53	21.5	28.75
Bio 7	9.32	206	186.58	± 1.59	167	172	182	185	194.75	202	203.75	67	11.56	0.06	10.38	12.75
Bio 13	7.42	206	315.47	± 10.1	196	213	269.25	314	358	404.5	428.5	411	73.5	0.23	65.23	88.75
Bio 17	10.84	206	100.54	± 4.63	51	62.5	81	95	117.75	150.5	163.75	178	33.66	0.33	26.69	36.75
Perfil bioclimático al 2050, promedio de tres MCG (CCSM4, HadGEM2-AO y MIROC5): RCP 8.5 Áreas de Bajo Impacto																
Bio 5	56.04	206	226.3	± 2.99	192.25	195.5	212	227	242	255	262.75	109	21.77	0.1	22.24	30
Bio 6	16.34	206	34.4	± 2.68	2.75	8	19	34	48	58.5	69.75	89	19.52	0.57	22.24	29
Bio 7	9.32	206	191.9	± 1.63	174	176	186	190	201	208	210	67	11.84	0.06	10.38	15
Bio 13	7.42	206	273.51	± 8.83	180.25	189	231	270.5	306.75	352.5	373.5	381	64.35	0.24	54.86	75.75
Bio 17	10.84	206	79.39	± 3.59	41.5	51	63	75	91.5	121.5	129	138	26.09	0.33	19.27	28.5

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

5.- CONCLUSIONES

Las temperaturas extremas, Bio 5 y Bio 6 (temperatura máxima del mes más cálido y temperatura mínima del mes más frío), son las que determinan la distribución actual de *P. patula*, contribuyen al modelo de nicho con 56.04 y 16.34 %, las cuales muestran una relación negativa con idoneidad; es decir mayor idoneidad con temperaturas más bajas. El modelo de nicho predice que al 2050, las áreas de idoneidad alta (> 0.48) para esta especie podrían reducirse en promedio entre 25 y 28 %, en un RCP 4.5 y 8.5. Las áreas más vulnerables al cambio climático donde se distribuye *P. patula* se registran sobre mayores latitudes y menores altitudes y parece obedecer a un incremento de casi 2 °C (Bio 5) en esas regiones. El modelo de nicho predice nuevas áreas idóneas sobre menores latitudes, especialmente en Sudamérica, incluso sobre menores altitudes a la distribución actual de la especie. Independientemente del escenario climático al 2050 (RCP 4.5 y 8.5) la especie *P. patula* podría verse afectada en su distribución geográfica.

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.
- Aguirre, G. J., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 875–882.
- Alba, L. M. P., González, E. M., Ramírez, M. N. & Castillo, S. M. A. (2003). Determinantes De La Distribución De *Pinus* Spp. En La Altiplanicie Central De Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73;7-15.
- Pardos, J. A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global (Vol. 20). Madrid: inia.
- Alfaro-Ramírez, F. U., Ramírez- Alborez, J. E., Vargas-Hernández, J. J., Franco- Maass, S., & Pérez-Suárez, M. (2020). Potential reduction of Hartweg´s Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE*, 15(2), 1–18.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K., (2018). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors,

- J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfeld (eds.)]. *In Press*. 46–91.
- Aiello-Lammens, M. E.; Boria, R. A.; Radosavljevic, A.; Vilela, B.; Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38,541–545.
- Avello Martínez, R., & Seisdedo Losa, A. (2017). El procesamiento estadístico con R en la investigación científica. *MediSur*, 15(5), 583–586.
- 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>
- Busby, J. R. (1986). Bioclimatic prediction system (BIOCLIM) user's manual version 2.0. *Australian Biological Resources Study Leaflet*.
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6, 8-9.
- 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>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, Villaseñor, J. L. Ortiz, E. (2014). Modelado de distribución de especies potenciales y el uso del análisis de componentes principales como variables predictoras. *Rev. Mex. Biodivers.* 85,189-199.
- De Marco, P.; Nóbrega, C.C. (2018). Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. *PLoS ONE*, 13, e0202403.
- Del Castillo, R. F., Terrazas, T., Trujillo, A. S., Rivera, G. R. (2020). Use of remote sensing and anatomical evidence at contrasting elevations to infer climate change sensitivity: preliminary results in *Pinus patula*. *Botanical Sciences*. 98(2): 248-263.
- Dvorak, W. S.; Donahue, J. K. Camcore cooperative research review 1980-1992. (1992).

North Carolina: *North Carolina State University*, 93 p.

- Díaz, C.G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*. Volumen XXXVII, N
- 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>
- Elith, J. & Leathwick, J. (2009). Modelos de distribución de especies: explicación ecológica y predicción a través del espacio y el tiempo. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40,677–697.
- 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>
- Escobar S., R. A. (1967). Aspectos biológicos del *Pinus patula*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 42 p.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., Romero, C. R., Conde, Á. A. C., & Trejo, V. R. I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. México, D. F.: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*.
- Flores, A., Méndez-González, J., & Muñoz-Flores, H. J. (2021). Degraded forest lands and pine plantations in homogeneous ecological areas. *Agro Productividad*, 14(7): 49–59. doi: 10.32854/agrop.v14i7.1911.
- Flores, A., & Moctezuma-López, G. (2021). Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de germoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), 122-140. doi: 10.29298/rmcf.v12i66.829.
- Fourcade, Y.; Besnard, A. G.; Secondi, J. (2018). Paintings predict the distribution of species, or the challenge of selecting environmental predictors and evaluation statistics. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 27,245–256.

- Franklin, J. (2009). *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*; Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido.
- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3–13. <https://doi.org/10.19136/era.a5n13.1396>.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z.-L., & Zhang, M. (2011). The community climate system model version 4. *Journal of Climate*, 24, 4973–4991 <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4083.1>
- 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>.
- González, H. A., Morales, V., Romero, S. M., Islas, T. B., Pérez, M. R. (2020). Modelización de la distribución potencial de un escarabajo de corteza de pino en bosques templados mexicanos utilizando datos de pronóstico y herramientas de análisis espacial. *J. Por. Res.*, 31,649–659.
- Graham, M. G. (2003). Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*, 84, 2809–2815.
- 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, 147–186.
- Guisan, A., Petitpierre, B., Broennimann, O., Daehler, C., & Kueffer, C. (2014). Unifying niche shift studies: insights from biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(5), 260-269.
- Harrison, S. P., Bartlein, P. J., & Prentice, I. C. (2016). What have we learnt from palaeoclimate simulations?, *Journal of Quaternary Science*, 31(4), 363–385.
- Hijmans, J. R., S. Cameron E., J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25:

1965-1978.

- Hirzel, A. H. & Lay, G. L. (2008). Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology*, 45, 1372–1381.
- Hirzel, A., Hausser, J., & Perrin, N. (2002). Biomapper 3.1. Lausanne Univ. *Laboratory for Conservation Biology*.
- 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)
- Ihaka, R & Gentleman. (1996). R: A language for data analysis and graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5(3), 299–314.
- 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.
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217–240.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., ... & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 1-20.
- Khan, M. M., Reddy, K. G., Rao, D. K. (2015). Diseño de muestreo estratificado en encuestas económicas y empresariales. *J. Appl. Stat.* 42,2080–2099.
- Krebs, C. J. (1985). *Ecología: estudio de la distribución y la abundancia* (No. 574.5 K92e). México, MX: *Edit. Harla*.
- Ladrach, W. E. (1985). Comparisons between provenances and sources of fourteen conifers in the Colombian Andes after five years. Res. Rep. 102. Cali, Colombia: Cartón de Colombia S.A. 13 p.
- Lê, S., Josse, J., Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for multivariate analysis. *J. Stat. Softw.* 25,1–18.
- Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., & Gay, C. (1997). Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research*, 9, 107–114.
- Manzanilla, Q. U., Aguirre, C. O. A., Jiménez, P. J., Treviño, G. E. J., & Yerena, Y. J. I.

- (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521804. doi: 10.21829/myb.2019.2521804
- Martin, G. M., Bellouin, N., Collins, W. J., Culverwell, I. D., Halloran, P. R., Hardiman, S. C., Hinton, T. J., Jones, C. D., McDonald, R. E., McLaren, A. J., O'Connor, F. M., Roberts, M. J., Rodríguez, J. M., Woodward, S., Best, M. J., Brooks, M. E., Brown, A. R., Butchart, N., Dearden, C., ... Wiltshire, A. 2011. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723–757. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-723-2011>
- Martínez, A. R., Villanueva, D. J., Manzanilla-Quiñones, U., Becerra-López, J. L., Hernández-Herrera, J. A., Estrada-Ávalos, J., & Velázquez-Pérez, A. H. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm (Pinaceae): A species conservation proposal in Mexico. *Investigaciones Geográficas*.
- Martínez, M. E., Sosa, E. J. E., & Álvarez, F. (2014). The study of the biodiversity in Mexico: A route with a course? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(SUPPL.), 1–9. <https://doi.org/10.7550/rmb.43248>
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217–240.
- 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>
- Mendoza, M. G., Salinas, M. Y., Olivo, M. A., Zúñiga, G. (2011). Factores que influyen en la distribución geográfica de *Dendroctonus rhizophagus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en la Sierra Madre Occidental, México. *Medio Ambiente. Entomol.* 40,549–559.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander Jr, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Miller, G. T., de León Rodríguez, I., & Velázquez, V. G. (1994). Ecología y medio ambiente: introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de

- conservación del planeta Tierra (No. 574.5 M55Y 1992). *Grupo Editorial Iberoamérica*.
- Monterroso, R. A., Gómez D. J., Tinoco, R. J. (2012). Bosque Mesófilo De Montaña Y Escenarios De Cambio Climático: Una Evaluación En Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. doi: 10.5154
- Morales, N. S., Fernández, I. C., Baca-González, (2017). Configuración de parámetros de V. MaxEnt y pequeñas muestras: ¿Estamos prestando atención a las recomendaciones? Una revisión sistemática. *PeerJ*, 5,e3093.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P. y Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Nyoka, B. I. (2002). *Pinus patula* Schiede ex Schldtl. & Cham. En: CAB International (comp). Pines of Silvicultural Importance. London, UK. *CABI Publishing*. p. 303-316.
- 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 áreas. *Ecological Modelling*, 263, 10-18.
- Pearson, Richard. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361–371.
- Pérez M. R., Moreno S. F., González H. A. y Arreola P. V. (2012). Escenarios De La Distribución Potencial De *Pinus patula* Schldtl. et Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. Con Modelos De Cambio Climático En El Estado De México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol. 4 No: 15.
- Perry Jr, J. P. (1991). The pines of Mexico and central America. Timber Press, Inc.
- 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. *Ecol. Model.* 213,63–72.
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez, M. E., Nakamura,

- M., Araújo, M. B. (2011). *Ecological Niches and Geographical Distributions*; Princeton University Press: Princeton, NJ, EE.UU.
- Phillips, S. J., M. Dudík, and R. E. Schapire. (2005). Maxent software for species distribution modeling. www.cs.princeton.edu/schapire/maxent
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Phillips, S. J., Dudík, M., & Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning* (p. 83).
- Radosavljevic, A.; Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *J. Biogeogr.* 41,629–643.
- Ramos-Dorantes, D. B., J. L. Villaseñor, E. Ortiz, and D. S. Gernandt. 2017. Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Rev. Mex. Biodiv.* 88: 215-223.
- Raynal-Villaseñor, J. A. (2011). Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 12(4), 421–427.
- Reynoso, S. R., Pérez, H. M. J., López, B. W., Hernández, R. J., Muños, F. H. J., Vidal, C. J., & Reynoso, S. M. D. (2018). El Nicho Ecológico Como Herramienta Para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, Vol. 9 (48).
- 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>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595–623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz, R. C., Rehfeldt, G. E., Ortega, R. J. M., Marín, T. M. C., & Madrigal, S. X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and Future Climate. *Botanical*

- Sciences*. 93(4), 709-718. doi: 10.17129/botsci.86
- Sánchez González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14(1), 107–120.
- Shcheglovitova, M.; Anderson, R. P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecol. Model.* 269,9–17.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Soberón, J., Peterson, T. A. (2005). Interpretación de modelos de nichos ecológicos fundamentales y áreas de distribución de especies. *Biodivers. Informat.* 2,1–10.
- Stockwell, R. B. D., and A. Peterson T. (2002). Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecol. Model.* 148: 1-13.
- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65-66.
- Tesfaye, M. A., Gardi, O., Anbessa, T. B., Blaser, J. (2020). Aboveground biomass, growth and yield for some selected introduced tree species, namely *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus saligna*, and *P. patula* in Central Highlands of Ethiopia. *J. Ecol. Environ.* 44, 1–18.
- Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangéat, I., & Araujo, M. B. (2011). Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470, 531–534. doi: 10.1038/nature09705
- VanDerWal, J., Shoo, L. P., Johnson, C. N., & Williams, S. E. (2009). Abundance and the environmental niche: environmental suitability estimated from niche models predicts the upper limit of local abundance. *American Naturalist*, 174, 282-291.
- Vázquez, D. P. (2005). Reconsiderando el nicho hutchinsoniano. *Ecología Austral*, 15(2), 149-158.
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., & Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque (Valdivia)*, 34(2), 173-179.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O’Ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T.,

- CHikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312–6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>.
- Wormald, T.J. (1975). *Pinus Patula*. Tropical Forestry 7. Oxford, UK: *Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute*. 212 p.
- Van Zonneveld, M., Jarvis, A., Dvorak, W., Lema, G., & Leibing, C. (2009). Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management*, 257(7), 1566-1576.
- 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.

7.- ANEXOS

Anexo 1. Superficie de idoneidad actual para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., estratificada (baja, media y alta) para cada estado o país.

Estado	Superficie por estados de idoneidad climática (km ²)				Porcentaje de la idoneidad climática			
	Baja	Media	Alta	Sup. Km ²	Baja	Media	Alta	Total %
Campeche	2071.76	0.00	0.00	2071.76	0.35	0.00	0.00	0.35
Chiapas	62570.10	2073.61	1594.71	66238.42	10.59	0.35	0.27	11.21
CDMX	865.29	397.24	244.62	1507.15	0.15	0.07	0.04	0.26
Coahuila	5381.83	0.93	0.00	5382.76	0.91	0.00	0.00	0.91
Guanajuato	14560.02	27.21	0.00	14587.23	2.47	0.01	0.00	2.47
Guerrero	58436.18	2109.06	98.07	60643.31	9.89	0.36	0.02	10.27
Hidalgo	14336.66	3693.00	2678.57	20708.24	2.43	0.63	0.45	3.51
Jalisco	2429.49	0.00	0.00	2429.49	0.41	0.00	0.00	0.41
México	16571.21	5188.93	763.81	22523.95	2.81	0.88	0.13	3.81
Michoacán	41041.25	380.79	0.00	41422.04	6.95	0.06	0.00	7.01
Morelos	4573.73	323.95	55.28	4952.96	0.77	0.06	0.01	0.84
Nuevo León	30053.57	939.11	379.25	31371.94	5.09	0.16	0.06	5.31
Oaxaca	74416.18	5817.54	3943.18	84176.90	12.60	0.99	0.67	14.25
Puebla	22547.61	5471.36	6706.09	34725.06	3.82	0.93	1.14	5.88
Querétaro	10694.63	427.77	455.35	11577.75	1.81	0.07	0.08	1.96
San Luis Potosí	51008.12	198.44	267.89	51474.45	8.63	0.03	0.05	8.71
Tabasco	21808.28	0.00	0.00	21808.28	3.69	0.00	0.00	3.69
Tamaulipas	38568.92	791.01	130.95	39490.88	6.53	0.13	0.02	6.69
Tlaxcala	1442.37	2374.50	206.80	4023.67	0.24	0.40	0.04	0.68
Veracruz	45253.81	1687.90	3650.40	50592.11	7.66	0.29	0.62	8.56
Zacatecas	6811.84	0.00	0.00	6811.84	1.15	0.00	0.00	1.15
Guatemala	9661.82	2390.69	183.51	12236.02	1.64	0.41	0.03	2.07
Total	535104.67	34293.03	21358.49	590756.19	90.58	5.80	3.62	100.00

Anexo 2. Idoneidad climática (km²) de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., al 2050, estimada a través de máxima entropía, utilizando proyecciones climáticas de tres modelos de circulación general en dos RCP's (4.5 y 8.5) en el área de calibración.

Estado	CCSM4						HadGEM2-AO						MIROC5								
	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		
	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI	NA	AAI	ABI
Campeche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiapas	72.11	751.23	2884.26	3364.2	535.47	3248.74	150.77	728.47	2896.74	150.77	1299.26	2269.21	3026.93	91.74	3689.4	2478.3	206.46	3538.36			
CDMX	0	204.29	436.44	0	666.3	0	0	373.03	268.84	0	404.26	237.61	0	437.82	204.04	0	653.12	0			
Coahuila	0	0.93	0	0	0.97	0	0	0.93	0	0	0.93	0	0	0.93	0	0	0.93	0			
Guanajuato	0	24.43	2.94	0	30.73	0	0	27.56	0	0	24.43	2.94	0	27.21	0	0	27.2	0			
Guerrero	0	1098.48	1092.56	0	2437.23	83.7	0	1485.66	640.56	0	1385.49	761.62	0	1229.83	958.47	0	1653.99	492.11			
Hidalgo	0	2577.98	3808.25	0	5388.98	1284.88	0	3722.22	2626.26	0	3469.5	2908.07	0	3442.41	3033.24	0	5168.72	1258.91			
Jalisco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
México	29.07	4037.02	1922.76	0	6159.59	0	15.41	4924.96	1029.81	15.41	4903.5	1035.24	0	5692.94	262.02	0	5963.64	0			
Michoacán	0	333.08	14.13	0	485.56	0	0	380.78	0	0	353.31	12.75	0	380.78	0	0	380.77	0			
Morelos	1.91	151.55	233.53	0	386.1	0	1.91	286.26	98.72	1.91	261.62	113.42	0	297.21	82.02	0	389.05	0			
Nuevo León	9.43	563.58	793.01	0	1418.19	0	0	1138.77	213.11	0	594.16	730.64	0	1336.53	37.58	0	1391.76	0			
Oaxaca	98.58	3427.6	6322.77	1113.5	5824.96	4685.68	157.66	4046.89	5671.8	288.39	5263.99	4562.52	1410.5	2949.63	7054.5	1045	4330.31	5597.34			
Puebla	32.25	3041.51	9158.99	484.11	7254.6	4981.06	55.56	4132.77	8026.37	57.18	4494.67	7681.47	359.24	4287.1	7928.15	231.2	6637.02	5544.06			
Querétaro	0	270.37	615.88	0	721.66	240.47	0	498.47	407.68	0	364.78	536.14	0	444.8	445.05	0	652.34	220.28			
San Luis Potosí	0	198.44	267.89	0	356.46	191	0	391.52	83.89	0	306.22	163.51	0	160.57	315.98	0	314.9	154.85			
Tabasco	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Tamaulipas	47.13	531.2	384.28	0	1024.58	0	0	760.54	161.26	37.73	481.12	439.47	0	954.77	19.06	0	972.98	0			
Tlaxcala	0	1623.48	894.04	0	2530.15	0	11.68	2047.2	506.01	10.05	2031.19	515.5	0	2399.13	176.89	0	2577.69	5.15			
Veracruz	50.2	1198.25	4152.9	913.74	749.37	4692.29	54.3	1332.1	4024.12	80.19	1374.39	4001.87	742.78	89.55	5360.79	619.33	812.63	4598.3			
Zacatecas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Guatemala	803.15	385.13	2267.55	3664.2	109.54	2541.53	564.76	825.05	1771.45	987.1	984.03	1600.29	2872.8	0	2638.18	2794.6	0	2648.46			
Total	1143.8	20418.6	35252.2	9539.8	36080.4	21949.3	1012	27103.2	28426.6	1628.7	27996.9	27572.3	8412.25	24223	32205.4	7168.4	32133.5	24057.8			