

## Hábitat climático actual y futuro de especies del género *Pinus* de Michoacán, México

### Current and future climatic of species of the genus *Pinus* of Michoacan, Mexico

Ulises Manzanilla-Quiñones<sup>1\*</sup> , Patricia Delgado-Valerio<sup>1</sup> ,  
Aldo Rafael Martínez-Sifuentes<sup>2</sup> , Agustín Molina-Sánchez<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Agrobiología "Presidente" Juárez Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas número 2290, colonia Emiliano Zapata CP. 60170. Uruapan, Uruapan, Michoacán, México.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 6.5, margen derecha canal de sacramento. CP. 35079. Gómez Palacio, Gómez Palacio, Durango, México.

\*Autor de correspondencia: [ulises\\_manza@hotmail.com](mailto:ulises_manza@hotmail.com)

#### Artículo científico

Recibido: 2 de marzo 2024

Aceptado: 18 de septiembre 2024

**RESUMEN.** Los escenarios de cambio climático son proyecciones del clima futuro y evalúan como estas modificaciones tienen un efecto sobre la composición, estructura y distribución de la biodiversidad mundial. El objetivo de este estudio fue probar la hipótesis de que las proyecciones de cambio climático prevén una reducción sustancial del hábitat climático de 14 especies del género *Pinus* en Michoacán, México. Se obtuvieron los registros geográficos de 14 especies de pinos distribuidos en Michoacán. Se descargaron las 19 variables bioclimáticas actuales (1970-2000) y futuras (2041-2060) de los Modelos de Circulación Global (MCG) HADGEM3\_ES y MPI\_ESM\_LR con una trayectoria socioeconómica compartida 245 de WORLDCLIM. Los registros y variables fueron cargados al Maxent, donde se emplearon el 75% de los registros para entrenar y el 25% para validar los modelos, los cuales fueron evaluados mediante las pruebas del área bajo la curva (AUC), Roc parcial y Z. Los resultados estas pruebas fueron excelentes (AUC > 0.88, > 1.52, p < 0.01). Las variables más relevantes de las 14 especies fueron temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5), precipitación del trimestre más cálido (Bio18), precipitación anual acumulada (Bio12) y temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6). Con base en los resultados obtenidos, se acepta la hipótesis planteada, debido a que se prevén reducciones importantes en el hábitat climático de 13 de las 14 especies, siendo las especies más susceptibles al cambio climático; *P. hartwegii*, con una reducción de su hábitat climático de 42.3%, *P. leiophylla* (43.5%), *P. devoniana* (44.2%), *P. herrerae* (59.7%) y *P. martinezii* (62.9%).

**Palabras clave:** Análisis espacial, Distribución potencial, Escenarios de cambio climático, Modelos de circulación global, Nicho climático.

**ABSTRACT.** Climate change scenarios are projections of future climate and evaluate how these modifications have an effect on the composition, structure and distribution of global biodiversity. The objective of this study was to test the hypothesis that climate change projections foresee a substantial reduction in the climatic habitat of 14 species of the genus *Pinus* in Michoacán, Mexico. Geographic records were obtained for 14 pine species distributed in Michoacán. The 19 current (1970-2000) and future (2041-2060) bioclimatic variables were downloaded from the Global Circulation Models (GCMs) HADGEM3\_ES and MPI\_ESM\_LR with a shared socioeconomic trajectory 245 from WORLDCLIM. The records and variables were loaded into Maxent, where 75% of the records were used to train and 25% to validate the models, which were evaluated using the area under the curve (AUC), partial Roc and Z tests. The results of these tests were excellent (AUC > 0.88, > 1.52, p < 0.01). The most relevant variables for the 14 species were average maximum temperature of the warmest period (Bio5), precipitation of the warmest quarter (Bio18), accumulated annual precipitation (Bio12) and average minimum temperature of the coldest period (Bio6). Based on the results obtained, the hypothesis is accepted, because significant reductions in climatic habitat are expected for 13 of the 14 species, with the species most susceptible to climate change being *P. hartwegii*, with a reduction in climatic habitat of 42.3%, *P. leiophylla* (43.5%), *P. devoniana* (44.2%), *P. herrerae* (59.7%) and *P. martinezii* (62.9%).

**Keywords:** Spatial analysis, Potential distribution, Climate change scenarios, Models of circulation global, Climate niche.

**Como citar:** Manzanilla-Quiñones U, Delgado-Valerio P, Martínez-Sifuentes AR, Molina-Sánchez A (2025) Hábitat climático actual y futuro de 14 especies del género *Pinus* de Michoacán, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(1): e4030. DOI: 10.19136/era.a12n1.4030.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha documentado por la comunidad científica mundial que el cambio climático es un fenómeno global que representa una gran amenaza hacia los sistemas sociales y ecológicos, motivo por el cual se han invertido muchos recursos sobre su entendimiento y estimación de posibles consecuencias en los sectores antropogénico y ecológico (IPCC 2014, Fernández-Eguiarte *et al.* 2015, UNAM-UNIATMOS 2023). Diversos estudios prevén que, debido a los efectos del cambio climático, la estructura y funcionalidad de los ecosistemas terrestres y acuáticos sufrirían modificaciones importantes a escala local, regional y global (IPCC 2014, CONANP-PNUD México 2019, Brassiolo y Vicuña 2023).

A través del uso de técnicas de modelación espacial de distribución potencial de especies, los investigadores han logrado generar proyecciones que pretenden plasmar el comportamiento de la distribución espacial de las especies (Sáenz-Romero *et al.* 2015, Aceves-Rangel *et al.* 2018, Martínez-Sifuentes *et al.* 2020). Aunado a esto, los Modelos de Circulación Global (MCG) se utilizan para simular el comportamiento del clima a futuro (Fernández-Eguiarte *et al.* 2015, UNAM-UNIATMOS 2023), por lo que representan una opción para evaluar los posibles impactos del cambio climático en la distribución de las especies (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Pérez-Miranda *et al.* 2019, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024).

México es considerado un centro secundario de diversificación del género *Pinus*, el cual se encuentra representado por 49 de las 120 especies identificadas en el mundo (Gernandt y Pérez-de-la-Rosa 2014). Para el caso de Michoacán, se tiene registro de 14 especies reportadas como nativas (Madrigal 1982, Manzanilla-Quiñones *et al.* 2023). La evidencia científica señala que los trabajos efectuados sobre esta índole en México proyectan reducciones significativas en las áreas de distribución y disponibilidad de hábitat climático de especies pertenecientes a la familia Pinaceae (Sáenz-Romero *et al.* 2012, 2015, Martínez-Sifuentes *et al.* 2020, Manzanilla-Quijada *et al.* 2024). Estudios como el de Sáenz-Romero *et al.* (2012, 2015), mencionan una reducción del 95% en el hábitat climático de *Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham.), presente en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y del 76% del hábitat climático de *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham., para finales de siglo en México. Mientras que Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) determinaron que las áreas de distribución ambientalmente aptas para el crecimiento y desarrollo de 12 especies de Pináceas en el estado de Michoacán se verían reducidas un 16 y 40% a partir de los periodos 2015-2039 y 2075-2099, respectivamente. Mientras que Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019b) estimaron una reducción de hasta 26.9% en el hábitat climático subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl., en la Faja Volcánica Transmexicana para 2041-2060. En tanto que Martínez-Sifuentes *et al.* (2020) prevén una reducción de hasta 21.8% en el hábitat climático de *Pinus greggii* Engelm., en México para el periodo 2041-2060.

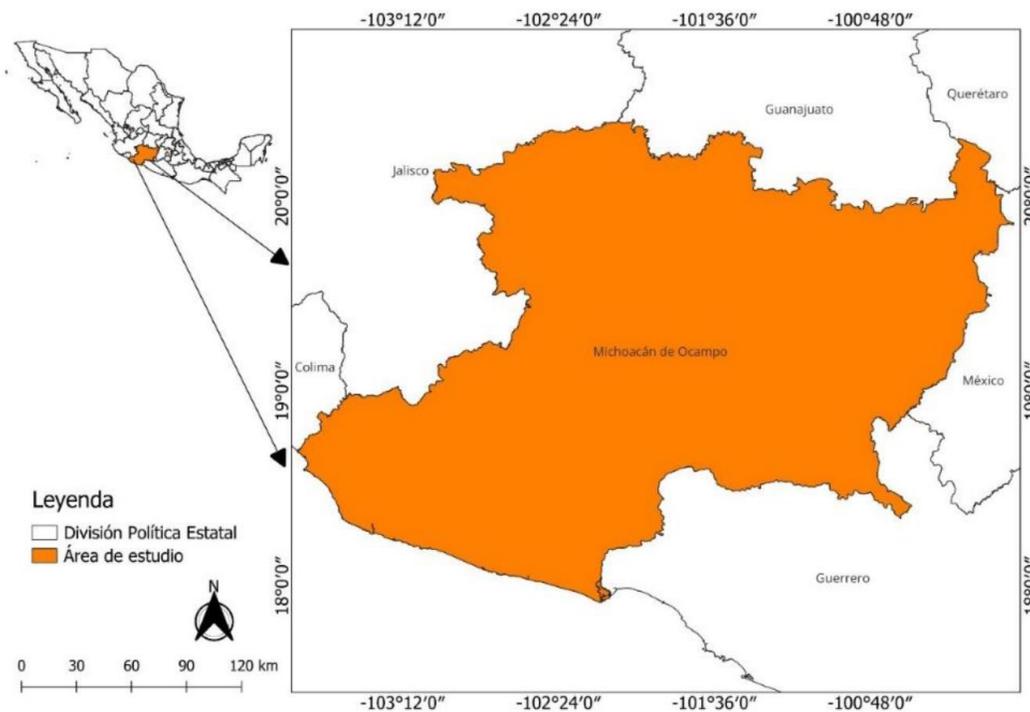
La importancia y motivo de este estudio radica en que no se ha delimitado la disponibilidad del hábitat climático actual y el proyectado a futuro (2041-2060) de las especies del género *Pinus* de Michoacán, siendo una primera aproximación el estudio efectuado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016), quienes evaluaron la distribución potencial actual y futura de 10 especies de pinos en el estado. Por lo que, con base en este trasfondo analizado y de acuerdo con el panorama mundial actual acerca de las tendencias y las proyecciones del clima futuro, la hipótesis formulada en este estudio, es que

a futuro el cambio climático reduciría sustancialmente el hábitat climático de 14 especies del género *Pinus* distribuidas de manera natural en el estado de Michoacán de Ocampo, México. Los objetivos planteados fueron modelar el hábitat climático actual y futuro (2041-2060) de 14 especies del género *Pinus* del estado de Michoacán de Ocampo, México, determinar las variables bioclimáticas más relevantes para cada especie analizada, estimar la superficie actual y futura del hábitat climático disponible para las 14 especies de pinos evaluadas e identificar las especies más susceptibles a los efectos del cambio climático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de estudio corresponde a la superficie del estado de Michoacán de Ocampo, localizado hacia el occidente de la República Mexicana, entre las coordenadas geográficas 20° 23' 40" y 17° 54' 54" latitud norte y los 100° 03' 47" y 103° 44' 17" longitud oeste. El área de estudio comprende una superficie estimada por INEGI (2017) de 58 836.95 km<sup>2</sup> (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio.

### Clima

Los tipos de climas registrados en el estado de Michoacán de Ocampo corresponden a A(w) cálido subhúmedo con lluvias en verano, ACm semicálido húmedo con una temporada de lluvias en verano, ACw semicálido subhúmedo con lluvias en verano, C(m) templado húmedo con una marcada estacionalidad de lluvias en verano, C(w) templado subhúmedo con lluvias durante el

verano, C(E)m) semifrío húmedo con lluvias en el verano, C(E)(w) semifrío subhúmedo con una temporada de lluvias en el verano, BS1(h') seco muy cálido (INEGI 2017).

### Registros de presencia de las especies evaluadas

Los registros de presencia de las especies analizados proceden de bases de datos de la plataforma Niche Toolbox de Conabio (Osorio-Olvera *et al.* 2020) y de expediciones realizadas en campo durante el periodo 2012-2020 (Delgado *et al.* 2015). Los registros de presencia corresponden a las especies del género *Pinus* reportadas de manera natural en Michoacán (Madrigal 1982): *Pinus devoniana* Lindl, *P. douglasiana* Martínez, *P. hartwegii* Lindl, *P. herrerae* Martínez, *P. lawsonii* Roetzl., *P. leiophylla* Schl. et Cham., *P. martinezii* Larsen, *P. maximinoi* Moore, *P. montezumae* Lamb., *P. oocarpa* Schiede, *P. pringlei* Shaw, *P. pseudostrobis* Lindl., *P. rzedowskii* Madrigal et Caballero y *P. teocote* Schl. et Cham.

### Depuración de registros de presencia

El proceso de limpieza de datos consistió en eliminar los registros de presencia que se localizaban fuera de su distribución natural (Perry 1991), así como aquellos que no contaban con una fuente de validación oficial. Se eliminó la autocorrelación espacial entre registros de las especies con ayuda de la plataforma Niche Toolbox (Osorio-Olvera *et al.* 2020), proceso que ayudó a evitar el sobreajuste en los modelos por efecto de la autocorrelación espacial (Peterson y Nakazawa 2008) dejando así un solo registro por cada celda de 1 km. Finalmente se obtuvieron 30 registros para *P. devoniana*, 24 (*P. douglasiana*), 20 (*P. hartwegii*), 10 (*P. herrerae*), 25 (*P. lawsonii*), 152 (*P. leiophylla*), 12 (*P. martinezii*), 13 (*P. maximinoi*), 74 (*P. montezumae*), 46 (*P. oocarpa*), 17 (*P. pringlei*), 157 (*P. pseudostrobis*), 28 (*P. rzedowskii*) y 27 (*P. teocote*).

### VARIABLES BIOCLIMÁTICAS

Los datos empleados corresponden a las 19 variables bioclimáticas versión 2.1 de WORLDCLIM, las cuales presentan un formato tiff y tienen una resolución espacial de 1 km, estas variables fueron generadas a partir de registros de precipitación y temperatura provenientes de estaciones meteorológicas para el periodo 1970-2000 y representan el comportamiento climático promedio actual mundial (Fick y Hijmans 2017). Asimismo, en esa misma plataforma (WORLDCLIM) se descargaron las 19 variables bioclimáticas proyectadas al horizonte temporal 2041-2060 para los Modelos de Circulación Global (MCG) HADGEM3\_ES (Centro Meteorológico Hadley del Reino Unido) y MPI\_ESM\_LR (Instituto Max Plank de Alemania), empleados en los estudios de evaluación de los escenarios de cambio climático a nivel mundial y en México (UNAM-UNIATMOS 2023, WORLDCLIM 2023). Las variables bioclimáticas de ambos MCG fueron descargados bajo una trayectoria socioeconómica compartida (TSC) de 245, es decir, una trayectoria intermedia, donde la economía mundial es muy divergente, con crecimiento poblacional mundial moderado, el cual se estabiliza en la segunda mitad del siglo y las emisiones de gases de efecto invernadero futuras, muy parecidas a las actuales, en este escenario se asume la implementación de medidas de adaptación al cambio climático (SSP 2023).

## Selección de variables

La selección de las variables empleadas en la modelación del hábitat climático actual de las 14 especies del género *Pinus* de Michoacán se efectuó mediante un análisis del factor de inflación de la varianza (VIF) en el programa R versión 4.0 (R Core Team 2022), que permitió descartar las variables redundantes (coeficiente de correlación de Pearson  $\geq 0.85$ ,  $p < 0.01$ ) para evitar que la autocorrelación afectará los resultados de los modelos de hábitat climático (Peterson y Nakazawa 2008). El número de variables seleccionadas para cada especie fueron 12 (*P. leiophylla*), 10 (*P. maximinoi*, *P. lawsonii* y *P. pseudostrobus*), 9 (*P. douglasiana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pringlei*, *P. rzedowskii* y *P. teocote*), 8 (*P. devoniana*), 7 (*P. hartwegii* y *P. martinezii*) y 4 (*P. herrerae*). En la Tabla 1 se describen las variables bioclimáticas seleccionadas para cada especie evaluada.

**Tabla 1.** Descripción de las variables bioclimáticas actuales seleccionadas para las 14 especies de estudio

Variable	Clave	Especie													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Oscilación diurna de la temperatura (°C)	Bio2	*	*	*		*	*				*	*			*
Isotermalidad (Bio2/Bio7) * (100)	Bio3	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Estacionalidad de la temperatura (Coeficiente de variación %)	Bio4		*	*	*	*	*		*	*		*	*		*
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)	Bio5	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*
Temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C)	Bio6		*			*	*	*	*	*	*	*	*		*
Oscilación anual de la temperatura (°C)	Bio7								*				*		
Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)	Bio10							*							
Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)	Bio11													*	
Precipitación anual acumulada (mm)	Bio12	*	*			*	*		*	*	*	*			
Precipitación del periodo más lluvioso (mm)	Bio13				*						*			*	*
Precipitación del periodo más seco (mm)	Bio14				*		*	*						*	
Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)	Bio15	*		*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)	Bio16				*			*						*	
Precipitación del trimestre más seco (mm)	Bio17	*	*			*	*		*	*	*	*	*	*	*
Precipitación del trimestre más cálido (mm)	Bio18	*	*			*	*		*	*	*	*	*	*	*
Precipitación del trimestre más frío (mm)	Bio19	*	*	*		*	*	*	*	*			*	*	*

Especie: 1. *P. devoniana*, 2. *P. douglasiana*, 3. *P. hartwegii*, 4. *P. herrerae*, 5. *P. lawsonii*, 6. *P. leiophylla*, 7. *P. martinezii*, 8. *P. maximinoi*, 9. *P. montezumae*, 10. *P. oocarpa*, 11. *P. pringlei*, 12. *P. pseudostrobus*, 13. *P. rzedowski* y 14. *P. teocote*. \*Variable seleccionada para cada especie analizada.

## Modelación de hábitat climático actual

La generación de los modelos de hábitat climático de las 14 especies de pinos de Michoacán se realizó en el programa Maxent versión 3.4.4 (Phillips *et al.* 2017), debido a la naturaleza de los datos analizados, los cuales corresponden a registros de presencia. Se procedió a generar 10 modelos para cada especie, usando el 75% de los datos y el 25% restante para la validación (Phillips *et al.* 2006) y las variables bioclimáticas seleccionadas de cada especie en formato ascii. Los parámetros de

configuración para las corridas del modelado de hábitat climático fueron 1 000 iteraciones, un límite de convergencia de 0.00005 (valor por omisión), replicado interno por Bootstrap (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019b), asimismo se desactivaron las opciones Extrapolate y Do Clamping, esto con la finalidad de evitar sobreajustes en los valores extremos de las variables de los modelos (Elith *et al.* 2011), se estableció un umbral de mínima presencia (Pearson *et al.* 2007) y el formato de salida seleccionado fue el acumulativo, que representa un índice de valores de 0 a 100%. Por último, la contribución del porcentaje de cada variable en la generación de los modelos de hábitat climático de cada especie fue estimado mediante la aplicación de la prueba de Jackknife por el programa Maxent (Phillips *et al.* 2006).

### Calibración de los modelos

Las áreas de modelación espacial (M) empleadas corresponden a las subprovincias fisiográficas de (INEGI 2001) Neovolcánica Tarasca (*P. devoniana*, *P. douglasiana*, *P. herrerae*, *P. lawsonii*, *P. maximinoi*, *P. leiophylla*, *P. martinezii*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pringlei*, *P. pseudostrobis* y *P. teocote*), Mil Cumbres (*P. devoniana*, *P. douglasiana*, *P. hartwegii*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. martinezii*, *P. maximinoi*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobis*, *P. pringlei* y *P. teocote*), Escarpa Limítrofe del Sur (*P. devoniana*, *P. douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pringlei* y *P. pseudostrobis*), Sierras y Bajíos Michoacanos (*P. devoniana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. maximinoi*, *P. pringlei*, *P. pseudostrobis* y *P. teocote*), Cordillera Costera del Sur (*P. douglasiana*, *P. herrerae*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobis* y *P. rzedowskii*), Depresión del Balsas (*P. oocarpa*, *P. pringlei* y *P. pseudostrobis*), Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (*P. devoniana* y *P. hartwegii*) y Chapala (*P. devoniana* y *P. oocarpa*). Las áreas de modelación espacial (M) utilizadas en la calibración de los modelos de hábitat climático se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Subprovincias fisiográficas utilizadas como áreas de calibración espacial (M) para las 14 especies del género *Pinus* evaluadas en Michoacán.

Subprovincia fisiográfica	Especie													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Neovolcánica Tarasca	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mil Cumbres	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		*
Escarpa Limítrofe del Sur	*	*			*	*			*	*	*	*		
Sierras y Bajíos Michoacanos	*				*	*		*			*	*		*
Cordillera Costera del Sur			*			*				*		*	*	
Depresión del Balsas										*	*	*		
Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo	*		*											
Chapala	*									*				

Especie: 1. *P. devoniana*, 2. *P. douglasiana*, 3. *P. hartwegii*, 4. *P. herrerae*, 5. *P. lawsonii*, 6. *P. leiophylla*, 7. *P. martinezii*, 8. *P. maximinoi*, 9. *P. montezumae*, 10. *P. oocarpa*, 11. *P. pringlei*, 12. *P. pseudostrobis*, 13. *P. rzedowski* y 14. *P. teocote*. \*registros de presencia

## Evaluación de los modelos

La evaluación del desempeño y calidad del modelado de hábitat climático de cada especie de pino de Michoacán se determinó mediante los valores de las métricas de los análisis del Área Bajo la Curva (AUC) de ROC estándar (Phillips *et al.* 2006), Roc Parcial (Osorio-Olvera *et al.* 2020), así como los resultados de la prueba de Z, éstas dos últimas pruebas se consideran más confiables y robustas que la prueba de AUC de ROC estándar (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2023).

## Modelación a futuro

Para generar los modelos de hábitat climático a futuro, fue necesario transferir los parámetros de modelación actual y las variables bioclimáticas seleccionadas de cada uno de los MCG HADGEM3\_ES y MPI\_ESM\_LR TSC 245 para cada una de las especies de pino, proyectado al horizonte temporal 2041-2060 en el programa Maxent versión 3.4.4 (Phillips *et al.* 2017).

## Estimación del hábitat climático actual y futuro

La estimación de la superficie (hectáreas) del hábitat climático idóneo actual y futuro (2041-2060) de las 14 especies de pinos de Michoacán se realizó mediante la reclasificación de los valores continuos de la salida acumulativa de Maxent para cada uno de los modelos con el mejor ajuste y desempeño estadístico. La reclasificación de valores fue de tres categorías de idoneidad climática (Baja, Moderada y Alta) con intervalos iguales (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2023), la cual se efectuó con la herramienta reclasificar por tabla del programa Qgis versión 3.2.3 (Qgis 2018). A partir del valor de la categoría de idoneidad climática alta, se transformaron los modelos continuos a binarios (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2023).

De acuerdo con el nivel de reducción del hábitat climático (ha) proyectado a futuro para cada una de las 14 especies de pinos evaluadas, se clasificaron los resultados de los MCG en escenarios de cambio climático de tipo optimista y pesimista (Sáenz-Romero *et al.* 2012, 2015), cuyo criterio propuesto para la clasificación de un escenario de tipo pesimista, fue la estimación de un nivel de reducción de hábitat climático mayor al 40% en ambos MCG. Finalmente, la elaboración y edición de los mapas de idoneidad del hábitat climático actual y futuro (bajo escenarios de cambio climático) de las 14 especies de pinos de Michoacán se realizó con ayuda del programa de código libre Qgis versión 3.2.3 (Qgis 2018).

## RESULTADOS

### Modelación de hábitat climático actual

Los resultados de los modelos de nicho climático de las 14 especies evaluadas presentaron valores en el área bajo la curva (AUC) de 0.88 a 0.99 para los datos de entrenamiento, mientras que para los datos de validación fueron de 0.89 a 0.99. Mientras que la prueba de Roc parcial fluctuó de 1.52 a 1.98. Los valores del estadístico Z fueron de 80.17 a 3503.7 ( $p < 0.01$ ). En la Tabla 3 se muestran los resultados de las pruebas de AUC, Roc parcial y estadístico Z, así como el número de réplica que mejor desempeño estadístico obtuvo para cada especie evaluada.

**Tabla 3.** Resultados de las pruebas de AUC, Roc parcial y estadístico Z de los modelos de hábitat climático de las 14 especies del género *Pinus* de Michoacán.

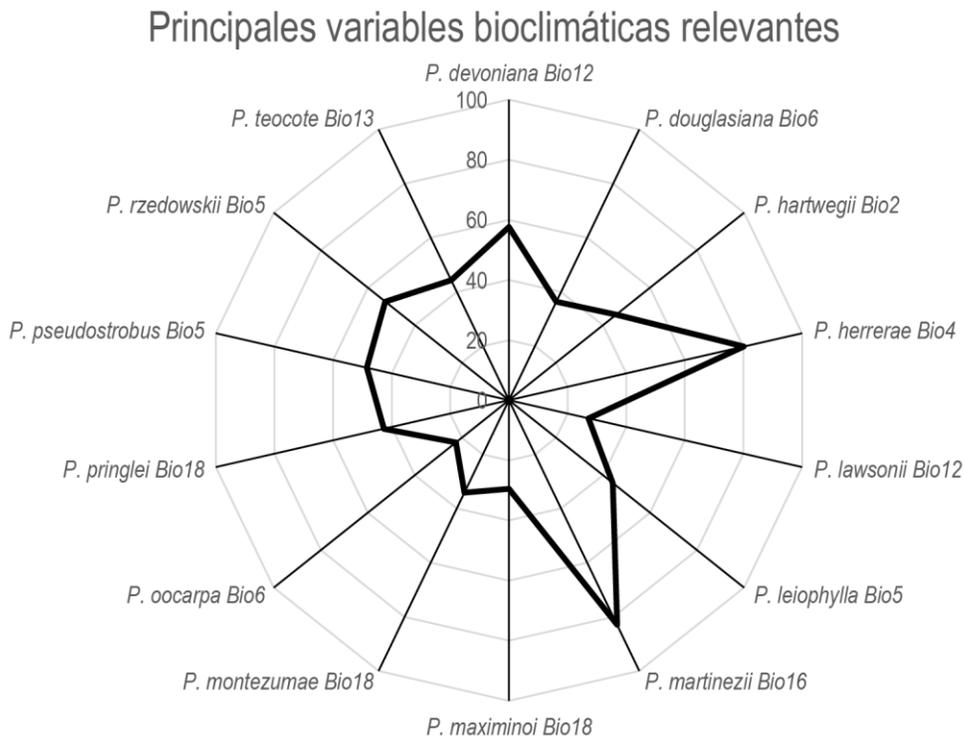
Especie	Réplica	AUC		Valor Roc parcial	Valor Z
		Entrenamiento	Validación		
<i>P. devoniana</i>	1	0.94	0.94	1.68	246.68*
<i>P. douglasiana</i>	7	0.97	0.98	1.82	238.69*
<i>P. hartwegii</i>	3	0.99	0.99	1.98	3503.7*
<i>P. herrerae</i>	1	0.97	0.99	1.94	1000.76*
<i>P. lawsonii</i>	7	0.92	0.97	1.80	330.7*
<i>P. leiophylla</i>	5	0.91	0.89	1.75	813.62*
<i>P. martinezii</i>	10	0.88	0.92	1.76	277.05*
<i>P. maximinoi</i>	10	0.88	0.93	1.52	80.17*
<i>P. montezumae</i>	1	0.89	0.92	1.75	452.16*
<i>P. oocarpa</i>	8	0.95	0.95	1.80	364.84*
<i>P. pringlei</i>	7	0.89	0.91	1.72	321.01*
<i>P. pseudostrobus</i>	1	0.94	0.94	1.85	2999.39*
<i>P. rzedowskii</i>	9	0.99	0.99	1.94	3333.66*
<i>P. teocote</i>	7	0.91	0.91	1.59	177.99*

\*Significativo,  $p < 0.01$ .

### Variables relevantes

Las variables bioclimáticas más relevantes en ambos horizontes temporales (actual y futuro) para cada especie de pino fueron, precipitación anual acumulada (Bio12, 57.6%) y temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 12.7%) para *P. devoniana*; temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6, 36.4%), precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 34%) y precipitación del trimestre más frío (Bio19, 19.1%) para *P. douglasiana*; oscilación diurna de la temperatura (Bio2, 45.7%) y estacionalidad de la precipitación (Bio15, 43.5%) para *P. hartwegii*; estacionalidad de la temperatura (Bio4, 80.1%) y temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 12.5%) para *P. herrerae*; precipitación anual acumulada (Bio12, 27.1%), temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 20.1%), estacionalidad de la temperatura (Bio4, 18.1%) y precipitación del trimestre más frío (Bio19, 13.2%) para *P. lawsonii*; temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 44.2%) y precipitación anual acumulada (Bio12, 25.8%) para *P. leiophylla*; precipitación del trimestre más lluvioso (Bio16, 82.9%) para *P. martinezii*; precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 29.5%), estacionalidad de la temperatura (Bio4, 23.1%), precipitación del trimestre más seco (Bio17, 19.1%), estacionalidad de la precipitación (Bio15, 10.2%) y temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6, 10.1%) para *P. maximinoi*; precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 34.1%), precipitación anual acumulada (Bio12, 29.8%) y estacionalidad de la precipitación (Bio15, 25%) para *P. montezumae*; temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6, 22.6%), estacionalidad de la precipitación (Bio15, 18%), temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 17.4%), precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 16.8%) e isothermalidad (Bio3, 14.8%) para *P. oocarpa*; precipitación del

trimestre más cálido (Bio18, 42.7%), temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6, 34%) y estacionalidad de la temperatura (Bio4, 17.6%) para *P. pringlei*; temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 48.5%) y precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 29.8%) para *P. pseudostrobus*; temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5, 52.6%) y temperatura promedio del trimestre más frío (Bio11, 16.2%) para *P. rzedowskii*; precipitación del periodo más lluvioso (Bio13, 44.3%), precipitación del trimestre más cálido (Bio18, 29.2%), estacionalidad de la precipitación (Bio15, 11.9%) y precipitación del trimestre más seco (Bio17, 10.9%) para *P. teocote*. En la Figura 2 se muestra la contribución en porcentaje de las principales variables bioclimáticas de cada especie analizada.



**Figura 2.** Contribución en porcentaje de las principales variables bioclimáticas de las 14 especies estudiadas.

### Hábitat climático actual

Acorde con la reclasificación de los valores de idoneidad climática alta de cada especie evaluada, se estimaron las siguientes superficies de hábitat climático actual; *P. devoniana* (86 582.6 ha), *P. douglasiana* (48 660.9 ha), *P. hartwegii* (2 098.4 ha), *P. herrerae* (10 046 ha), *P. lawsonii* (125 129.1 ha), *P. leiophylla* (107 116.9 ha), *P. martinezii* (91 539.7 ha), *P. maximinoi* (104 301.4 ha), *P. montezumae* (36 328.4 ha), *P. oocarpa* (39 581.8 ha), *P. pringlei* (259 240.6 ha), *P. pseudostrobus* (66 878.4 ha), *P. rzedowskii* (3 650.2 ha) y *P. teocote* (50 705.1 ha) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Resultados de las estimaciones de las superficies de hábitat climático actual y proyectado a futuro (2041-2060) de las 14 especies de pino evaluadas.

Especie	Actual (ha)	HADGEM3_ES (ha)	Porcentaje %	MPI_ESM_LR (ha)	Porcentaje %
<i>P. devoniana</i>	86582.6	48337.6	44.2*	14764.8	82.9*
<i>P. douglasiana</i>	48660.9	58968.1	21.2	71017.1	45.9
<i>P. hartwegii</i>	2098.4	161.5	92.3*	1211.0	42.3*
<i>P. herrerae</i>	10046.0	3484.0	65.3*	4050.7	59.7*
<i>P. lawsonii</i>	125129.1	62122.0	50.4*	121986.4	2.5*
<i>P. leiophylla</i>	107116.9	60524.0	43.5*	5650.6	94.7*
<i>P. martinezii</i>	91539.7	33946.3	62.9*	1937.2	97.9*
<i>P. maximinoi</i>	104301.4	65938.5	36.8*	8646.7	91.7*
<i>P. montezumae</i>	36328.4	30093.9	17.2*	11539.8	68.2*
<i>P. oocarpa</i>	39581.8	29933.5	24.4*	6151.1	84.5*
<i>P. pringlei</i>	259240.6	242707.7	6.4*	163754.5	36.8*
<i>P. pseudostrobus</i>	66878.4	48210.7	27.9*	60523.3	9.5*
<i>P. rzedowskii</i>	3650.2	2352.2	35.6*	2513.5	31.1*
<i>P. teocote</i>	50705.1	34737.9	31.5*	7656.5	84.9*

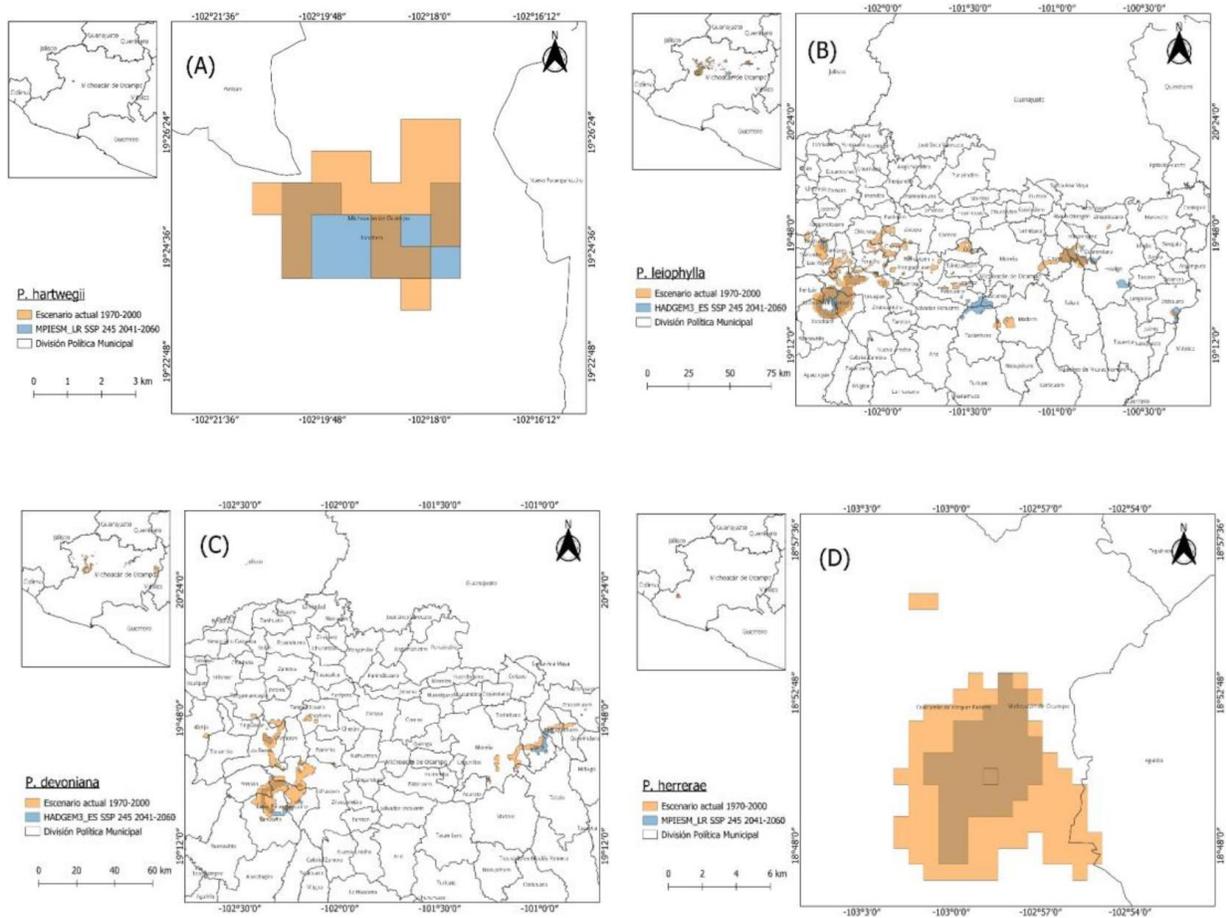
\*Reducción de hábitat climático.

### Hábitat climático futuro

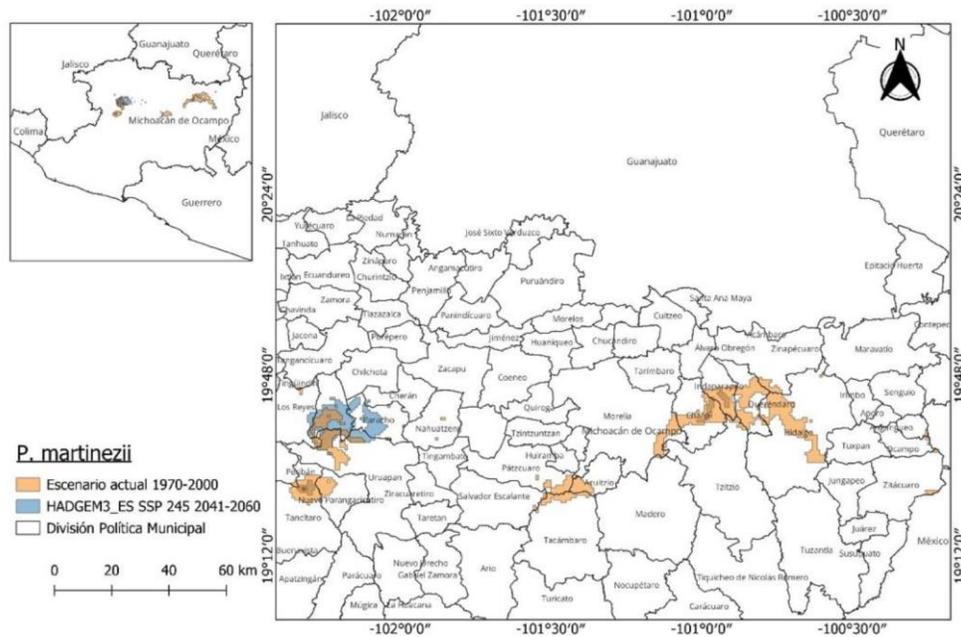
Los resultados del MCG HADGEM3\_ES TSC 245 proyectado a 2041-2060 estimó las siguientes superficies de hábitat climática futuro; *P. devoniana* (48 337.6 ha), *P. douglasiana* (58 968.1 ha), *P. hartwegii* (161.5 ha), *P. herrerae* (3 484 ha), *P. lawsonii* (62 122 ha), *P. leiophylla* (60 524 ha), *P. martinezii* (33 946.3 ha), *P. maximinoi* (65 938.5 ha), *P. montezumae* (30 093.9 ha), *P. oocarpa* (29 933.5 ha), *P. pringlei* (242 707.7 ha), *P. pseudostrobus* (48 210.7 ha), *P. rzedowskii* (2 352.2 ha) y *P. teocote* (34 737.9 ha). Por otra parte, el MCG MPI\_ESM\_LR TSC 245 estimó las siguientes superficies de hábitat climática futuro; *P. devoniana* (14 764.8 ha), *P. douglasiana* (71 017.1 ha), *P. hartwegii* (1 211 ha), *P. herrerae* (4 050.7 ha), *P. lawsonii* (121 986.4 ha), *P. leiophylla* (5 650.6 ha), *P. martinezii* (1 937.2 ha), *P. maximinoi* (8 646.7 ha), *P. montezumae* (11 539.8 ha), *P. oocarpa* (6 151.1 ha), *P. pringlei* (163 754.5 ha), *P. pseudostrobus* (60 523.3 ha), *P. rzedowskii* (2 513.5 ha) y *P. teocote* (7 656.5 ha) (Tabla 3).

### Especies más susceptibles

A partir de la comparativa de los resultados de modelación de hábitat climático actual y futuro de los MCG, se determinaron las especies más susceptibles a los efectos del cambio climático, los cuales fueron; *P. hartwegii* con una reducción de hábitat climático de 42.3% (Figura 3A), *P. leiophylla* con 43.5% (Figura 3B), *P. devoniana* con 44.2% (Figura 3C), *P. herrerae* con 59.7% (Figura 3D) y *P. martinezii* con 62.9% (Figura 4). Por otra parte, es importante mencionar que *P. douglasiana* es la única especie de pino que proyecta un aumento de 21.2% en su hábitat climático futuro en el estado de Michoacán de Ocampo (Figura 5).



**Figura 3.** Hábitat climático actual y futuro de *P. hartwegii* (A), *P. leiophylla* (B), *P. devoniana* (C) y *P. herrerae* (D) en Michoacán.



**Figura 4.** Hábitat climático actual y futuro de *P. martinezii* en Michoacán.

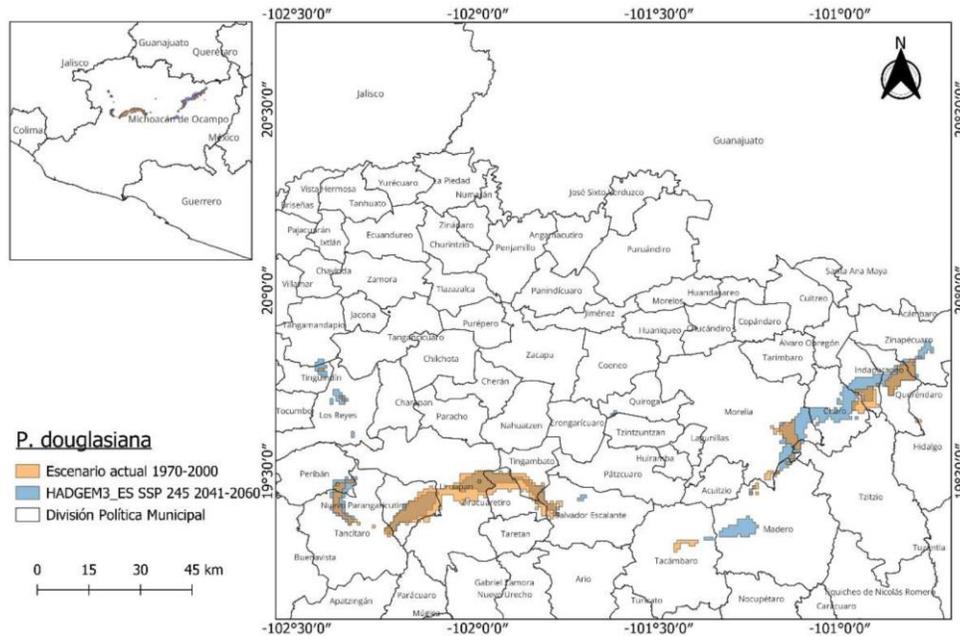


Figura 5. Hábitat climático actual y futuro de *P. douglasiana* en Michoacán.

## DISCUSIÓN

### Modelado de hábitat climático

El desempeño de los modelos seleccionados para cada una de las 14 especies de pinos de estudio se considera como excelente, esto con base en los resultados de las pruebas de AUC ( $> 0.88$ ), Roc parcial ( $> 1.52$ ) y estadístico Z ( $p < 0.01$ ) lo que indica que los modelos generados son confiables para los objetivos planteados en esta investigación (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2023).

### Variables relevantes

Las variables que mayor ponderación presentaron en la generación de la modelación de hábitat climático fueron temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5) para seis (*P. devoniana*, *P. herrerae*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus* y *P. rzedowskii*) de las 14 especies de pinos evaluadas. Resultados similares han sido reportados por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) para *P. leiophylla* y *P. rzedowskii* y Aceves-Rangel *et al.* (2018) para *P. pseudostrobus*, lo que indica que la variación de la temperatura máxima promedio durante la temporada más cálida, influye de forma significativa en la delimitación de la disponibilidad del hábitat climático. Por lo tanto, un aumento en la temperatura máxima durante el periodo más cálido del año, modifica el hábitat climático disponible de esas seis especies de pinos de Michoacán.

Para la precipitación del trimestre más cálido (Bio18), en la literatura científica, se menciona que la Bio18 es sumamente relevante en el hábitat climático de especies de abetos mexicanos como *Abies concolor*, *A. guatemalensis*, *A. durangensis* var. *durangensis*, *A. durangensis* var. *coahuilensis* y *A. vejarii* (Martínez-Méndez *et al.* 2016) y de algunas especies de pino como *P. herrerae*, *P. durangensis*, *P. engelmannii* y *P. leiophylla* (Aceves-Rangel *et al.* 2018). En este estudio se encontró que especies

como *P. douglasiana*, *P. maximinoi*, *P. montezumae*, *P. pringlei*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote*, requieren de un comportamiento más homogéneo de la precipitación del trimestre más cálido, principalmente en las regiones centro y oriente de Michoacán. Para la precipitación anual acumulada (Bio12) para *P. devoniana*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla* y *P. montezumae*, se puede decir que la cantidad de lluvia recibida durante todo el año es un factor determinante en la disponibilidad del hábitat climático de esas especies en Michoacán, siendo el caso de *P. montezumae*, una especie que requiere de ambientes más húmedos en su hábitat climático (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019b). En lo referente a la temperatura mínima promedio del periodo más frío (Bio6) para *P. douglasiana*, *P. oocarpa* y *P. pringlei*. Los resultados fueron similares a los obtenidos por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) y Aceves-Rangel *et al.* (2018) para *P. douglasiana*, lo que indica que la variación en la temperatura mínima promedio durante el mes más frío de invierno tiene relevancia en la disponibilidad del hábitat climático de *P. douglasiana*, *P. oocarpa* y *P. pringlei* en Michoacán.

Para la estacionalidad de la temperatura (Bio4) para *P. herrerae* y *P. maximinoi*. Resultados similares han sido reportados por Aceves-Rangel *et al.* (2018) para *P. maximinoi*, mientras que para *P. herrerae* no hay información disponible. La estacionalidad de la temperatura representa la variación que se presenta en el comportamiento de la temperatura anual, por lo que el hábitat climático idóneo de *P. herrerae* y *P. maximinoi* requiere de un coeficiente de variación en la temperatura bajo. En lo referente a la estacionalidad de la precipitación (Bio15) para *P. hartwegii* y *P. oocarpa*. Los resultados difieren con lo reportado por diversos estudios que emplean variables bioclimáticas en la modelación de distribución potencial, nicho ecológico y hábitat climático (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Aceves-Rangel *et al.* 2018, Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019a). En lo referente a la oscilación diurna de la temperatura (Bio2) para *P. hartwegii*, estudios realizados para la especie señalan como variables relevantes a la temperatura máxima promedio del periodo más cálido (Bio5), temperatura promedio anual (Bio1) y temperatura promedio del trimestre más cálido (Bio10), todas estas variables referentes al comportamiento de la temperatura (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Aceves-Rangel *et al.* 2018, Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019a). Sin embargo, no se hace mención de la oscilación diurna de la temperatura, la cual debe ser constante y con poca variación durante el día, algo similar a lo reportado por González *et al.* (2015) para *A. religiosa* ( $\pm 1.5$  °C) especie que suele coexistir con *P. hartwegii*. Por lo cual, se puede decir que las áreas de alta montaña cumplen con la disponibilidad de hábitat climático para esta especie.

Para la temperatura promedio del trimestre más frío (Bio11) para *P. rzedowskii*, especie endémica a la sierra de Coalcomán, la variación promedio de la temperatura mínima durante el invierno suele ser relevante en la disponibilidad del hábitat climático para la especie. En lo referente a la precipitación del periodo más lluvioso (Bio13) para *P. teocote*. Los resultados reportados por diversos autores señalan diferentes variables bioclimáticas relevantes (Bio6 y Bio5) para la especie (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, Aceves-Rangel *et al.* 2018). Pese a estas diferencias observadas, se considera que la cantidad de precipitación recibida durante el mes más lluvioso debe ser abundante, ya que es fundamental en la disponibilidad del hábitat climático de la especie. En lo referente a la precipitación del trimestre más lluvioso (Bio16) para *P. martinezii*. Los resultados son similares a lo reportado por Martínez-Méndez *et al.* (2016) para especies de abetos mexicanos y por Manzanilla-Quiñones *et al.* (2023) para *P. martinezii*, quienes enfatizan la importancia de la precipitación del trimestre más lluvioso en la determinación de las áreas de distribución de esas

especies de coníferas. A su vez, esto indica una preferencia de hábitat climático de *P. martinezii* a ambientes húmedos del centro-occidente de Michoacán.

### Escenarios de cambio climático

De acuerdo con las proyecciones de cambio climático del MCG HADGEM3\_ES TSC 245 para 2041-2060 se estiman reducciones que van desde 6.4% (*P. pringlei*) hasta 92.3% (*P. hartwegii*), mientras que el MCG MPI\_ESM\_LR TSC 245 proyecta disminuciones que oscilan de 2.5% (*P. lawsonii*) hasta 97.9% (*P. martinezii*) en el hábitat climático de 13 de las 14 especies de pinos evaluados en Michoacán. Se sabe que esta tendencia hacia la disminución en las superficies climáticas o de áreas de distribución de especies arbóreas, ya había sido previamente reportada por autores como Sáenz-Romero *et al.* (2015), Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019), Martínez-Sifuentes *et al.* (2020), Manzanilla-Quijada *et al.* (2024) quienes mencionan que las especies de la familia Pinaceae son muy susceptibles a las alteraciones en los patrones climáticos, principalmente al aumento en temperatura y la disminución en precipitación. Por lo que, una combinación en el aumento de la temperatura y la disminución en precipitación, ocasionaría una modificación sustancial en las áreas climáticas idóneas de las especies de pinos estudiadas, lo que a su vez provocaría que estas especies tengan que desplazarse altitudinalmente para hallar el clima propicio para su crecimiento y desarrollo (Manzanilla-Quiñones *et al.* 2019a) esto último estaría condicionado con la capacidad de resiliencia de cada especie.

### Especies más susceptibles

Acorde con los resultados sobre la estimación de reducción de hábitat climático generados por los modelos optimistas, las especies más susceptibles a los efectos del cambio climático son *P. hartwegii* (42.3%), *P. leiophylla* (43.5%), *P. devoniana* (44.2%), *P. herrerae* (59.7%) y *P. martinezii* (62.9%). Mientras que la reducción del hábitat climático de *P. hartwegii* difiere con lo reportado por Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019) quienes estimaron una reducción de la distribución potencial de la especie de 0.7% en el Pico de Tancítaro, mientras que en este estudio se encontró reducciones drásticas en la superficie climática idónea de la especie. Los resultados de *P. leiophylla* fueron superiores a lo reportado por Manzanilla-Quijada *et al.* (2024) quienes estimaron una reducción en las áreas de distribución de la especie de 17.8% en México. Mientras que, Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) estimaron una reducción del área de distribución de la especie de 72.6% en Michoacán para finales de este siglo. Los resultados de *P. devoniana* fueron inferiores a lo reportado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) quienes estimaron una reducción del área de distribución de la especie de 71.8% en Michoacán. Estas discrepancias probablemente se deban a la estimación de los escenarios de cambio climático efectuados a través de diferentes MCG, los cuales representan rutas del posible comportamiento del clima y sus efectos en la distribución de las especies. Para el caso de *P. herrerae* y *P. martinezii* no existen estudios previos sobre el tema. Mientras que *P. herrerae*, presenta un hábitat climático futuro localizado exclusivamente en la Sierra de Coalcomán, Municipio de Coalcomán, mientras que *P. martinezii* tiene su hábitat climático futuro en manchones localizados dentro de los municipios de Indaparapeo, Charo, Los Reyes, Charapan, Paracho y Tancítaro.

De las 14 especies de pinos evaluadas, *P. douglasiana* fue la única que presentó un cambio positivo (aumento) en la disponibilidad de hábitat climático. Resultados similares han sido reportados por Manzanilla-Quiñones *et al.* (2019) para *P. hartwegii* en el Nevado de Colima, Parque Izta-Popo y el

Cofre de Perote. Esto indica que el cambio climático futuro habilitaría áreas climáticas favorables para el crecimiento y desarrollo de *P. douglasiana* en Michoacán.

## CONCLUSIONES

Las proyecciones de cambio climático, indican que se prevén reducciones en el hábitat climático de 13 de las 14 especies de pinos evaluadas. Los resultados de la modelación del hábitat climático determinaron que *P. hartwegii*, *P. devoniana*, *P. leiophylla*, *P. herrerae* y *P. martinezii* son las especies de pinos más susceptibles a los efectos del cambio climático. Es importante mencionar que la reducción del hábitat climático de las especies evaluadas no quiere decir que estas vayan a desaparecer completamente de estos sitios, sino que es muy probable que presenten muchos factores que limiten su crecimiento, aumenten su mortalidad y su vulnerabilidad a plagas y enfermedades forestales, por lo que se recomienda en la medida posible implementar medidas de adaptación al cambio climático a través de programas de manejo asistido y mejoramiento genético.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo de beca de Estancias Posdoctorales para la Formación y Consolidación de Las y Los Investigadores (2022-2024) otorgada al primer autor. A la Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por las facilidades brindadas durante el desarrollo del trabajo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel LD, Méndez-González J, García-Aranda MA, Nájera-Luna JA (2018) Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* 52: 1043-1057.
- Brassiolo P, Vicuña S (2023) RED 2023: Cambio climático y biodiversidad: De las bases físicas a la perspectiva económica. Distrito Capital: CAF- banco de desarrollo de América Latina y el Caribe. 79p. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2100>. Fecha de consulta: 15 de febrero de 2024.
- CONANP-PNUD México (2019) Resumen ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático del Complejo de las ANP Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla-Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ciudad de México, México. 20p.
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva JT, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval JA (2016) Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán.

- Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 22(2): 135-148.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Delgado VP, Rebolledo-Camacho V, Flores-López C, García-Magaña JJ, González A, Piñero D, Vázquez-Lobo, AY (2015) Aproximación molecular para la evaluación genética de áreas productoras de semillas y de conservación en especies del género *Pinus*. Proyecto CONAFOR-2012-C01-176167.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudík M, Chee YE, Yates CJ (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologist. *Diversity and Distributions* 17(1): 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2001) Subprovincias fisiográficas. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Escala 1:1, 000, 000. Serie I.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017) Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo. Gobierno del estado de Michoacán de Ocampo. Morelia, Michoacán de Ocampo. 726p.
- IPCC (2014) Resumen para responsables de políticas. Contribución del grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. En Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Billir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (ed) Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 34p.
- Fernández-Eguiarte A, Zavala-Hidalgo J, Romero-Centeno R, Conde-Álvarez AC, Trejo-Vázquez RI (2015) Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. 22p.
- Fick SE, Hijmans RJ (2017) WORLDCLIM 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12): 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
- Gernandt SD, Pérez-de-la-Rosa JA (2014) Biodiversidad de *Pinophyta* (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Material suplementario 85: 126-133. Doi: 10.7550/rmb.32195.
- González HA, Pérez MR, Moreno SF, Ramírez OG, Rosales MS, Cano PA, Vidal GC, Esquivel TMC (2015) Variabilidad de la temperatura local en bosque de coníferas por efectos de la deforestación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(31): 22-39.
- Madrigal SX (1982) Claves para la identificación de coníferas silvestres del Estado de Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. 100p.
- Manzanilla-Quijada GE, Manzanilla-Quiñones U, Treviño-Garza EJ, Alanís-Rodríguez E, Silva-González E (2024) Efectos del cambio climático en la distribución de *Pinus chihuahuana* y *Pinus leiophylla*: una propuesta para la conservación en México. *ECUCBA* 11(21): 47-58.
- Manzanilla-Quiñones U, Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J, Treviño-Garza EJ, Yerena-Yamallel JI (2019a) Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques* 25 (2): e2521804. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>.
- Manzanilla-Quiñones U, Delgado VP, Hernández RJ, Molina SA, García Magaña JJ, Rocha Granados MC (2019b) Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana* 126: e1398. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>.
- Manzanilla-Quiñones U, Delgado-Valerio P, Pedraza-Santos ME, Molina-Sánchez A (2023) Modelado de idoneidad ambiental en la identificación de sitios potenciales para la toma de datos dendrocronológicos. *Madera y Bosques* 23(1): e2312464. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912464>.
- Martínez-Méndez N, Aguirre-Planter E, Eguiarte LE, Jaramillo-Correa JP (2016) Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences* 94(1): 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>.

- Martínez-Sifuentes AR, Villanueva-Díaz J, Manzanilla-Quiñones U, Becerra-López JL, Hernández-Herrera JA, Estrada-Ávalos J, Velázquez-Pérez A (2020) Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): A species conservation proposal in Mexico under climate change scenarios. *iForest* (13): 426-434. <https://doi.org/10.3832/ifer3491-013>.
- Osorio-Olvera L, Lira-Noriega A, Soberón J, Peterson AT, Falconi M, Contreras-Díaz RG, Martínez-Meyer E, Barve V, Barve N (2020) Ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution* 11(10): 1199-1206. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>.
- Pearson R, Raxworthy C, Nakamura M, Peterson AT (2007) Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34(1): 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>.
- Pérez-Miranda R, Romero-Sánchez ME, González-Hernández A, Rosales-Mata S, Moreno Sánchez F, Arriola-Padilla VJ (2019) Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(56): 2018-237. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.613>.
- Perry J (1991) *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Universidad de Texas. 231p.
- Peterson AT, Nakazawa Y (2008) Environmental data sets matter in ecological niche modelling: an example with *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri*. *Global Ecology and Biogeography* 17(1): 135-144. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00347.x>.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schaphire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4): 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Phillips SJ, Anderson RP, Miroslov D, Schaphire RE, Blair ME (2017) Opening the black box: an open release of Maxent. *Ecography* 40: 887-893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>.
- QGIS (2018) Un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto. Versión 3.2.3. <https://qgis.org/es/site/>. Fecha de consulta: 21 de noviembre de 2023.
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. Version 4.0. Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>. Fecha de consulta: 15 de marzo de 2023.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Duval P, Linding-Cisneros RA (2012) *Abies religiosa* habitat prediction in Climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275: 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.004>.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Ortega-Rodríguez JM, Marín-Togo MC, Madrigal-Sánchez X (2015) *Pinus leiophylla* Suitable Habitat For 1961-1990 and Future Climate. *Botanical Sciences* 93(4): 709-718. <https://doi.org/10.17129/botsci.86>.
- SSP (2023) The SSP Scenarios. Shared Socioeconomic Pathways. <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>. Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2023.
- UNAM-UNIATMOS (2023) Escenarios de cambio climático regionalizados CMIP5. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Universidad Nacional Autónoma de México Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales <https://atlasclimatico.unam.mx/cmip5/visualizador>. Fecha de consulta 20 de noviembre de 2023.
- WORLDCLIM (2023) Future Climate, 30 seconds spatial resolution. [https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6\\_clim30s.html](https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.html). Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2023.