



Distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. ante escenarios del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados en México

Potential distribution of *Pinus cembroides* Zucc. under scenarios from the Coupled Model Intercomparison Project in Mexico

Julio Nemorio Martínez-Sánchez¹, Tereza Cavazos², Homero Alejandro Gárate-Escamilla¹, Wibke Himmelsbach¹, Eduardo Alanís Rodríguez¹, José Israel Yerena Yamallel¹, Gerardo Cuéllar-Rodríguez^{1*}

Fecha de recepción/Reception date: 20 de agosto de 2025

Fecha de aceptación/Acceptance date: 9 de diciembre de 2025

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: luis.cuellarrd@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: luis.cuellarrd@uanl.edu.mx

Resumen

Pinus cembroides es una conífera piñonera resistente a condiciones secas y está ampliamente distribuida en zonas áridas y semiáridas de México, por lo que es ideal para evaluar los impactos del cambio climático en los bosques de coníferas. Se evaluaron los impactos de ese fenómeno sobre la distribución potencial de *P. cembroides* en México, a partir de dos escenarios climáticos de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6): SSP2-4.5 (incremento proyectado de 2.1 a 3.5 °C en la temperatura media hacia finales del siglo XXI) y SSP5-8.5 (incremento proyectado de 3.3 a 5.7 °C). La modelación se realizó con el algoritmo de máxima entropía (*MaxEnt*), empleando 1 696 registros de *P. cembroides* y 19 variables bioclimáticas de *CHELSA* v2.1. Las variables con mayor contribución fueron la temperatura del aire en el trimestre más seco (60.9 %) y en el trimestre más húmedo (28.9 %). Bajo las condiciones climáticas actuales, solo 6.3 % de las regiones montañosas de la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental mostraron alta idoneidad. Los cambios en la distribución futura se proyectaron mediante un Ensamble Multi-Modelo (EMM) del CMIP6 en el corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060), largo plazo (2061-2080) y finales del siglo XXI (2081-2100). En ambos escenarios, la distribución potencial disminuye hasta ~10 % del área actual a finales del siglo XXI, limitada a zonas más elevadas y húmedas de baja a media idoneidad en la Sierra de Juárez y la Sierra Madre Oriental.

Palabras clave: Cambio climático, *CHELSA*, CMIP6, distribución de especies, *MaxEnt*, modelos de distribución.

Abstract

Pinus cembroides is a piñon conifer resistant to dry conditions and is widely distributed in arid and semi-arid areas of Mexico, making it ideal for assessing the impacts of climate change on conifer forests. The impacts of climate change on the potential distribution of *Pinus cembroides* in Mexico was assessed, considering two climatic scenarios from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6): SSP2-4.5 (projected increase of 2.1 to 3.5 °C in mean temperature by the end of the twenty-first century) and SSP5-8.5 (projected increase of 3.3 to 5.7 °C). Modeling was based on the maximum entropy algorithm (MaxEnt), using 1 696 records of *P. cembroides* and 19 bioclimatic variables from CHELSA v2.1. The variables with the highest contributions were the temperature of the driest quarter (60.9 %) and the wettest quarter (28.9 %). Under the current climate conditions, only 6.3 % of mountainous regions in the *Sierra Madre Oriental* and *Sierra Madre Occidental* exhibited high suitability. Future changes in distribution were projected using a CMIP6 Multi-Model Ensemble (MME) in four periods: near-term (2021-2040), mid-term (2041-2060), far-term (2061-2080), and end of XXI century (2081-2100). In both scenarios, the potential distribution is projected to contract to ~10 % of its current extent by the end of the 21st century, limited to higher and wetter areas of low to medium suitability in *Sierra de Juárez* and *Sierra Madre Oriental*.

Keywords: Climate change, CHELSA, CMIP6, species distribution, MaxEnt, distribution models.

Introducción

Desde la década de 1970 se han registrado alteraciones significativas en los patrones globales de precipitación y temperatura asociadas al cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023a; Trenberth, 2011). El Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) proyecta que, sin medidas de mitigación, la temperatura media global aumentará entre 1.2 y 2.0 °C hacia 2050 y entre 2.0 y 4.0 °C hacia finales del siglo XXI (IPCC, 2023b). En el norte de México, la temperatura se ha incrementado 0.3 °C por década durante los últimos treinta años (Cavazos et al., 2020) y, bajo escenarios de emisiones altas, se proyecta un aumento superior a 4.5 °C en las próximas décadas (Almazroui et al., 2021).

Los ecosistemas forestales son altamente vulnerables al cambio climático (Hansen & Phillips, 2015). Su respuesta puede manifestarse de tres formas: (1) adaptación a las nuevas condiciones dentro de su distribución actual, (2) extinción local o (3) desplazamiento altitudinal o latitudinal hacia ambientes más favorables (Sáenz-Romero et al., 2017).

El análisis de estos impactos se ha realizado mediante modelos de distribución de especies (SDM), que integran registros de presencia con variables bioclimáticas actuales y proyectadas (Pearson *et al.*, 2007). Dichos modelos permiten identificar áreas climáticamente idóneas y cuantificar los factores que limitan la distribución, por lo que constituyen una herramienta clave para la conservación y el manejo forestal (Geng *et al.*, 2022). Entre los algoritmos disponibles, el de máxima entropía (*MaxEnt*) se ha empleado en el estudio de bosques de coníferas en México (Manzanilla-Quijada & Treviño-Garza, 2024).

México alberga cerca de la mitad de las especies del género *Pinus* (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020). La mayoría restringe su distribución a regiones montañosas, lo que incrementa su vulnerabilidad frente al cambio climático (Gómez-Pineda *et al.*, 2020). Proyecciones basadas en los escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) del CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, Fase 5) indican una contracción de los bosques templados, particularmente, en sus límites xéricos (Sáenz-Romero *et al.*, 2015).

Recientemente, estos escenarios se han complementado con las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) del CMIP6, que integran narrativas de desarrollo socioeconómico con distintos niveles de forzamiento radiativo (Eyring *et al.*, 2016). De los cinco escenarios propuestos, el SSP2-4.5 representa un camino intermedio con un forzamiento radiativo de 4.5 W m² y un incremento proyectado de 2.1 a 3.5 °C hacia finales del siglo XXI, mientras que el SSP5-8.5 corresponde a un desarrollo basado en combustibles fósiles y altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con un forzamiento de 8.5 W m² y un incremento de 3.3 a 5.7 °C (Eyring *et al.*, 2016; O'Neill *et al.*, 2016).

Pinus cembroides Zucc. es el pino piñonero con mayor distribución en México (Constante-García *et al.*, 2009). Se localiza en zonas de transición entre formaciones xerofíticas del Altiplano Mexicano, así como en la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal (Carlón-Allende *et al.*, 2018). Se caracteriza por su adaptabilidad y resistencia a sequías prolongadas y temperaturas extremas.

En el presente estudio se evalúa el impacto del cambio climático en la distribución potencial de *P. cembroides* mediante el algoritmo de máxima entropía *MaxEnt* y datos de *CHELSA* v2.1 (Karger et al., 2017) para el clima actual y proyecciones futuras del CMIP6. Los objetivos específicos fueron: (1) identificar las variables climáticas que determinan su distribución, (2) estimar los cambios en su distribución potencial bajo dos escenarios de cambio climático y (3) localizar áreas de idoneidad para su conservación en las próximas décadas.

Materiales y Métodos

El área de estudio corresponde a la distribución geográfica de *P. cembroides* en México, desde zonas semiáridas del norte hasta regiones subtropicales del centro y sur del país (García & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 1998). Las poblaciones de *P. cembroides* se localizan entre 1 350 y 3 500 msnm, donde las temperaturas oscilan entre 7 y 40 °C y la precipitación anual varía de 360 a 800 mm (Constante-García et al., 2009).

Los datos de ocurrencia se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2018) para el periodo 2009-2014 y el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2020). Se aplicó un análisis de autocorrelación espacial y se consideró únicamente un dato de presencia por cada celda de 1 km², eliminando los registros duplicados.

Se utilizaron 19 variables bioclimáticas de *CHELSA* v2.1 (CHELSA, 2025; Karger et al., 2017) para el periodo climático de referencia de 30 años correspondiente a 1981-2010 (clima actual), y los periodos futuros 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, se consideraron los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, a una resolución espacial de 1 km². Los datos fueron descargados mediante el paquete *Python 3.8 chelsa_cmip6_1.0*

(Karger et al., 2023). *CHELSA* v2.1 (Karger et al., 2017) presenta menor correlación con la topografía y una representación más precisa de las variables de precipitación y temperatura en regiones montañosas, en comparación con *WorldClim* v2.1 (Bobrowski et al., 2021). Para reducir la multicolinealidad entre variables, se aplicó un análisis de factor de inflación de la varianza (VIF), se estableció como criterio de exclusión un valor mayor a 10 (Dormann et al., 2013), de modo que se descartaron aquellas variables altamente correlacionadas.

Las variables bioclimáticas seleccionadas fueron: intervalo de temperatura diurna (*Bio 2*), isothermalidad (*Bio 3*), temperatura del trimestre más húmedo (*Bio 8*), del trimestre más seco (*Bio 9*), precipitación anual (*Bio 12*), del mes más seco (*Bio 14*), del trimestre más cálido (*Bio 18*) y del trimestre más frío (*Bio 19*).

La distribución potencial de *Pinus cembroides* se modeló con el *software MaxEnt* v3.4.4 (Phillips et al., 2006). En estudios previos se ha demostrado que *MaxEnt* ofrece capacidad predictiva confiable estadísticamente en comparación con otros algoritmos (Araújo & New, 2007). Para el entrenamiento del modelo se utilizó 75 % de los registros de presencia, y 25 % para validación (Merow et al., 2013; Phillips et al., 2006). Se empleó la salida logística de *MaxEnt* que genera valores de idoneidad para la especie (Phillips & Dudík, 2008), con 500 iteraciones como límite máximo y 10 000 puntos de fondo. Se utilizó una combinación de las clases lineal, cuadrático y producto con un límite de convergencia de 0.00001. Con base en estos valores, se establecieron los siguientes umbrales de clasificación: no idóneo (<0.1), baja idoneidad (0.1-0.3), idoneidad media (0.3-0.6) y alta idoneidad (>0.6) (Zhong et al., 2023). Para reducir la extrapolación se desactivaron las funciones *extrapolate* y *clamping* (Elith et al., 2011).

La importancia relativa de cada variable bioclimática se determinó mediante la prueba de *Jackknife* (Phillips et al., 2006). El desempeño del modelo se evaluó con el área bajo la curva (*AUC*) de la curva *ROC* (*Receiver Operating Characteristic*), considerando los intervalos de clasificación: insuficiente (0.5-0.6), pobre (0.6-0.7), bueno (0.8-0.9) y excelente (0.9-1.0) (Aguirre-Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010). Valores cercanos a 1

indican mayor correspondencia entre las variables bioclimáticas seleccionadas y la distribución potencial de la especie (Phillips & Dudík, 2008).

El uso individual de modelos de circulación general (GCM) incrementa la incertidumbre de las proyecciones de los SDM debido a sesgos en temperatura y precipitación (Stewart et al., 2022). Por ello, es recomendable emplear ensambles de diferentes GCM para obtener resultados más robustos (Thuiller et al., 2019). Se generó un Ensamble Multi-Modelo (EMM) a partir de los GCM que mejor representaron la variabilidad climática actual. Específicamente, se compararon 25 GCM de CMIP6 (Earth System Grid Federation [ESGF], 2025) con datos mensuales de CRU (Harris et al., 2014) para el periodo 1995-2014. Las métricas consideradas incluyeron el Patrón de Coeficiente de Correlación (*PCC*), Error Cuadrático Medio Centrado (*CRMSE*), Error Absoluto Medio (*MAE*), sesgo, Índice de *Skill* de Taylor (*TSS*) y la desviación estándar normalizada (*NSTD*). Se seleccionaron los GCM con valores de *PCC* y *TSS* cercanos a 1, y de *CRMSE*, *MAE*, *NSTD* y sesgo cercano a 0 (Colorado-Ruiz et al., 2018). Esta selección de modelos refuerza la confianza en la validez de las proyecciones futuras (Knutti et al., 2017). Los modelos seleccionados se usaron para generar las capas bioclimáticas para cada escenario en los cuatro periodos analizados.

Se compararon las proyecciones de distribución obtenidas para los diferentes escenarios a partir de las variables bioclimáticas derivadas del EMM. Para evaluar las diferencias entre la superficie actual y la proyectada, se calculó el porcentaje de cambio relativo (*%CR*) mediante la Ecuación 1 (Gutiérrez-García et al., 2015). Finalmente, se identificaron áreas estables o conservadas, áreas de ganancia y áreas de pérdida con el *software QGIS* versión 3.16 (QGIS, 2020).

$$\%CR = \frac{Si - So}{So} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Si = Superficie a futuro en cada escenario

So = Superficie total

Resultados y Discusión

Se obtuvieron 1 696 registros en total de *P. cembroides* a nivel nacional. El modelo basado en el algoritmo *MaxEnt* mostró una capacidad predictiva alta, con un valor de $AUC=0.894$ (Aguirre-Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010). Este resultado respalda la fiabilidad del modelo para predecir la distribución potencial de *P. cembroides*. *MaxEnt* es uno de los algoritmos más utilizados en estudios de coníferas en México (Manzanilla-Quñones *et al.*, 2019) ya que solo requiere datos de presencia y ofrece una capacidad predictiva confiable estadísticamente, en comparación con otros algoritmos individuales y métodos basados en ensambles. Sin embargo, se debe considerar que las proyecciones son vulnerables a sesgos que pueden ocasionar una sobrestimación estadística (Araújo & New, 2007).

Las variables bioclimáticas *Bio 9* y *Bio 8* explicaron 60.9 % y 28.9 % de la variabilidad, respectivamente (Cuadro 1).

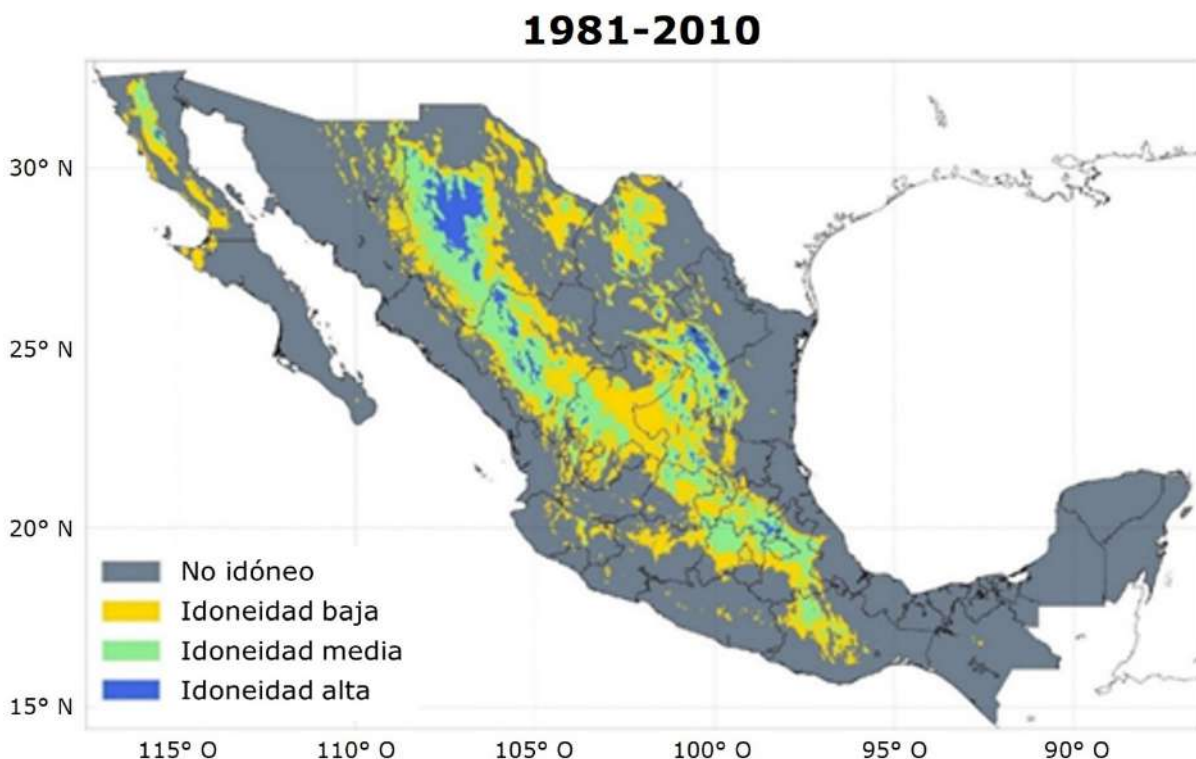
Cuadro 1. Contribución relativa (%) de las variables utilizadas en la distribución espacial de *Pinus cembroides* Zucc.

Variable	Descripción	Contribución (%)
<i>Bio 9</i>	Temperatura del trimestre más seco	60.9
<i>Bio 8</i>	Temperatura del trimestre más húmedo	28.9
<i>Bio 12</i>	Precipitación anual	3.4
<i>Bio 2</i>	Intervalo diurno de temperatura	3.0
<i>Bio 3</i>	Isotermalidad	2.1
<i>Bio 18</i>	Precipitación del trimestre más cálido	1.6
<i>Bio 14</i>	Precipitación del mes más seco	0.1

Variables bioclimáticas: Temperatura (°C), Precipitación (mm).

Los resultados son consistentes con estudios que señalan una mayor influencia de las variables térmicas en comparación con las pluviométricas en especies del género *Pinus*, al utilizar *WorldClim* v2.1 (Gómez-Pineda et al., 2020; Martínez-Sánchez et al., 2023). Aunque algunos trabajos basados en este mismo sistema han descartado las variables *Bio 8*, *Bio 9*, *Bio 18* y *Bio 19* debido a discontinuidades en la distribución de la precipitación (Escobar et al., 2014), en este estudio se conservaron, ya que *CHELSEA* v2.1 describe de manera más detallada la influencia de la topografía sobre la precipitación (Karger et al., 2017). Además, el uso de esos indicadores permite representar con mayor precisión la variabilidad interanual y las limitaciones ecológicas en zonas con fluctuaciones climáticas estacionales (Booth, 2022). En general, se considera que las temperaturas elevadas predicen la distribución de especies de amplia distribución geográfica como *P. cembroides* (Manzanilla-Quijada & Treviño-Garza, 2024).

La distribución actual de *P. cembroides* comprende la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 1). Se estimaron 3.17×10^5 km² (55.8 %), 2.15×10^5 km² (37.8 %) y 3.60×10^4 km² (6.3 %) en las categorías de idoneidad baja, media y alta, respectivamente.



No idóneo (<0.1), idoneidad baja (0.1-0.3), idoneidad media (0.3-0.6), idoneidad alta (>0.6).

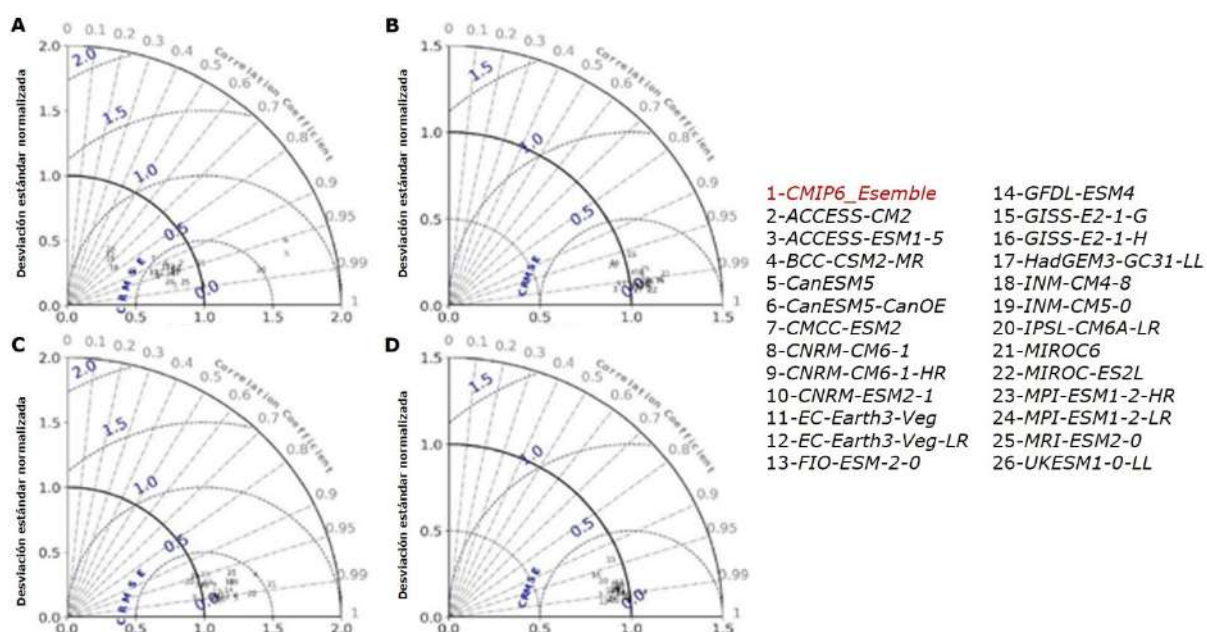
Figura 1. Distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. en el periodo 1981-2010.

Las zonas clasificadas con baja idoneidad se concentraron, principalmente, en gran parte de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transversal, así como en la Sierra de San Pedro Mártir, la Sierra de Juárez y el Altiplano Mexicano (Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas). Las áreas de idoneidad media se distribuyeron en franjas aisladas de la Sierra Madre Occidental (Chihuahua y Durango) y de la Sierra Madre Oriental (Nuevo León). En contraste, las regiones con alta idoneidad se restringieron a sectores específicos de Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Puebla.

En términos generales, la distribución geográfica de las áreas modeladas como idóneas concuerda con lo registrado en estudios previos (Martínez-Sánchez *et al.*, 2023; Téllez-Valdés *et al.*, 2019). Asimismo, la proyección potencial excede el intervalo geográfico

actual, un comportamiento común en los modelos de distribución de especies (SDM) basados exclusivamente en variables bioclimáticas (Soberón & Peterson, 2005).

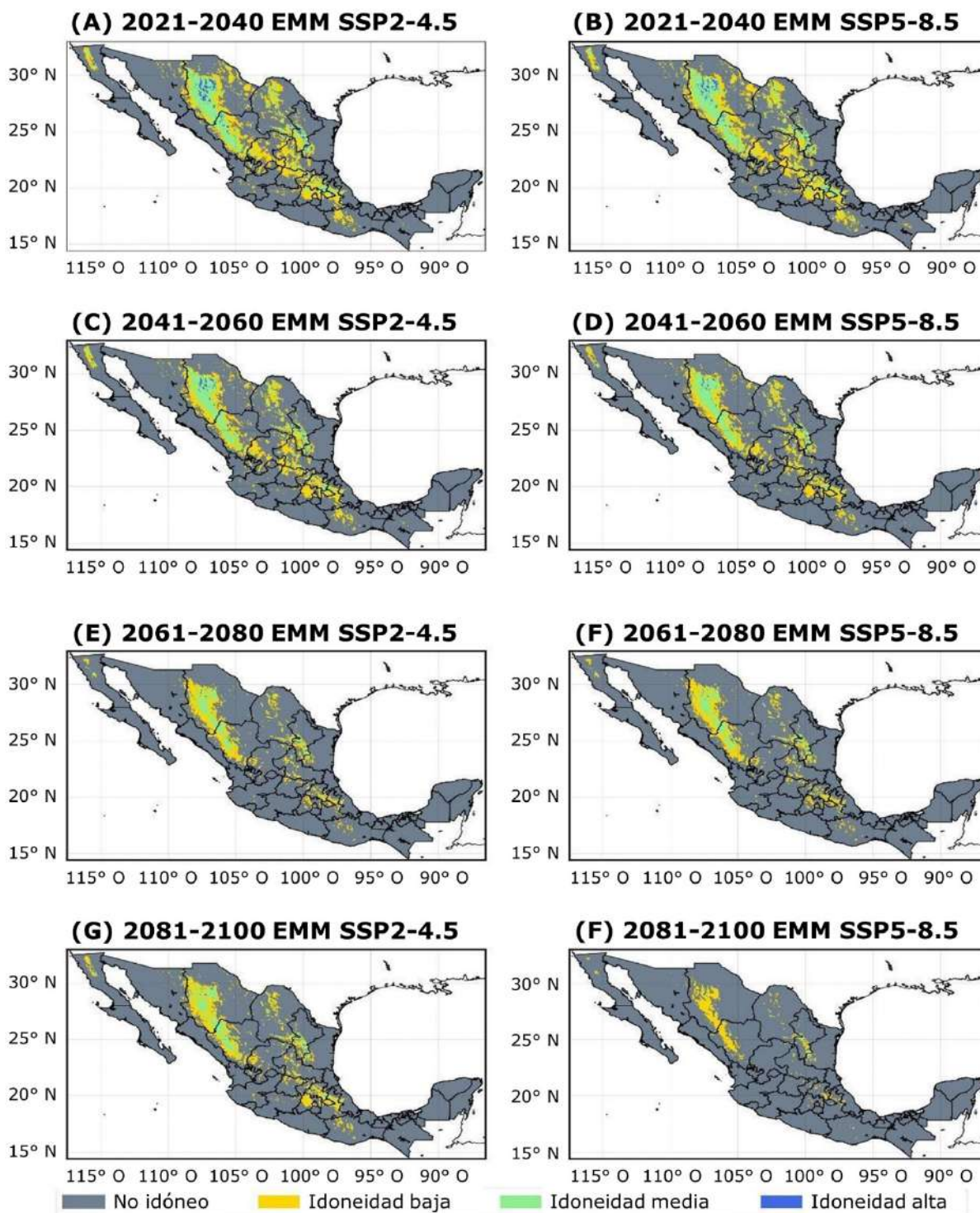
Con base en los diagramas de *Taylor* (Figura 2), los MCG seleccionados para el EMM fueron *ACCESS-CM2*, *EC-Earth3-Veg*, *FIO-ESM-2-0*, *HadGEM-GC31-LL*, *MPI-ESM1-2-HR* y *UKESM1-0-LL*. Estos modelos mostraron una mayor correlación y menores sesgos en la simulación del clima histórico regional, por lo que se consideraron apropiados para promediar sus proyecciones dentro del EMM (Almazroui et al., 2021).



A = Precipitación (*Pr*); B = Temperatura media (*Tas*); C = Temperatura máxima (*Tasmax*); D = Temperatura mínima (*Tasmin*). *Correlation coefficient* = Coeficiente de correlación.

Figura 2. Diagramas de *Taylor* para el periodo 1995 a 2014.

La Figura 3 muestra las variaciones en las áreas de idoneidad de *P. cembroides* bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En ambos casos, el modelo proyecta una disminución progresiva de las superficies con baja, media y alta idoneidad a lo largo de todos los periodos analizados.



A, C, E y G = Escenarios SSP2-4.5; B, D, F y H = Escenarios SSP5-8.5.

Figura 3. Distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. a corto (2021-2040), mediano (2041-2060), largo (2061-2080) y muy largo plazo (2081-2100) de acuerdo con el Ensamble Multi-Modelo (EMM).

En el periodo de referencia (1981-2010), la superficie idónea fue de 5.68×10^5 km². Bajo el escenario SSP2-4.5, se proyecta una reducción a 3.6×10^5 km² en 2021-2040, 2.9×10^5 km² en 2041-2060, 2.5×10^5 km² en 2061-2080 y 2.0×10^5 km² en 2081-2100. En el escenario SSP5-8.5, la disminución es más pronunciada, con valores de 3.6×10^5 km², 2.3×10^5 km², 1.5×10^5 km² y 0.5×10^5 km² en los periodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, respectivamente. Las superficies de idoneidad se resumen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Área pronosticada ($\times 10^5$ km²) de las regiones de idoneidad para *Pinus cembroides* Zucc. durante los periodos estudiados de acuerdo con el Ensamble Multi-Modelo (EMM).

Idoneidad	1981-2010	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
		SSP2-4.5	SSP2-4.5	SSP2-4.5	SSP2-4.5
		SSP5-8.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5
Baja (0.1-0.3)	3.2	2.4	1.9	1.7	1.5
		2.3	1.6	1.2	0.5
Media (0.3-0.6)	2.1	1.2	0.9	0.7	0.4
		1.2	0.7	0.3	0.02
Alta (>0.6)	0.4	0.08	0.03	0.02	<0.1
		0.06	0.01	<0.1	<0.1

En todos los casos, se observa que las áreas de idoneidad baja son las más extensas, pero también las que presentan una mayor reducción, mientras que las áreas de idoneidad alta son muy pequeñas en la actualidad y prácticamente desaparecen bajo ambos escenarios. La mayor parte de las áreas actualmente idóneas se perderán en las cordilleras principales (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico Transversal). En el escenario más extremo SSP5-8.5 en 2081-2100 (Figura 4H) se proyecta una reducción cercana a 90 % de la distribución potencial.

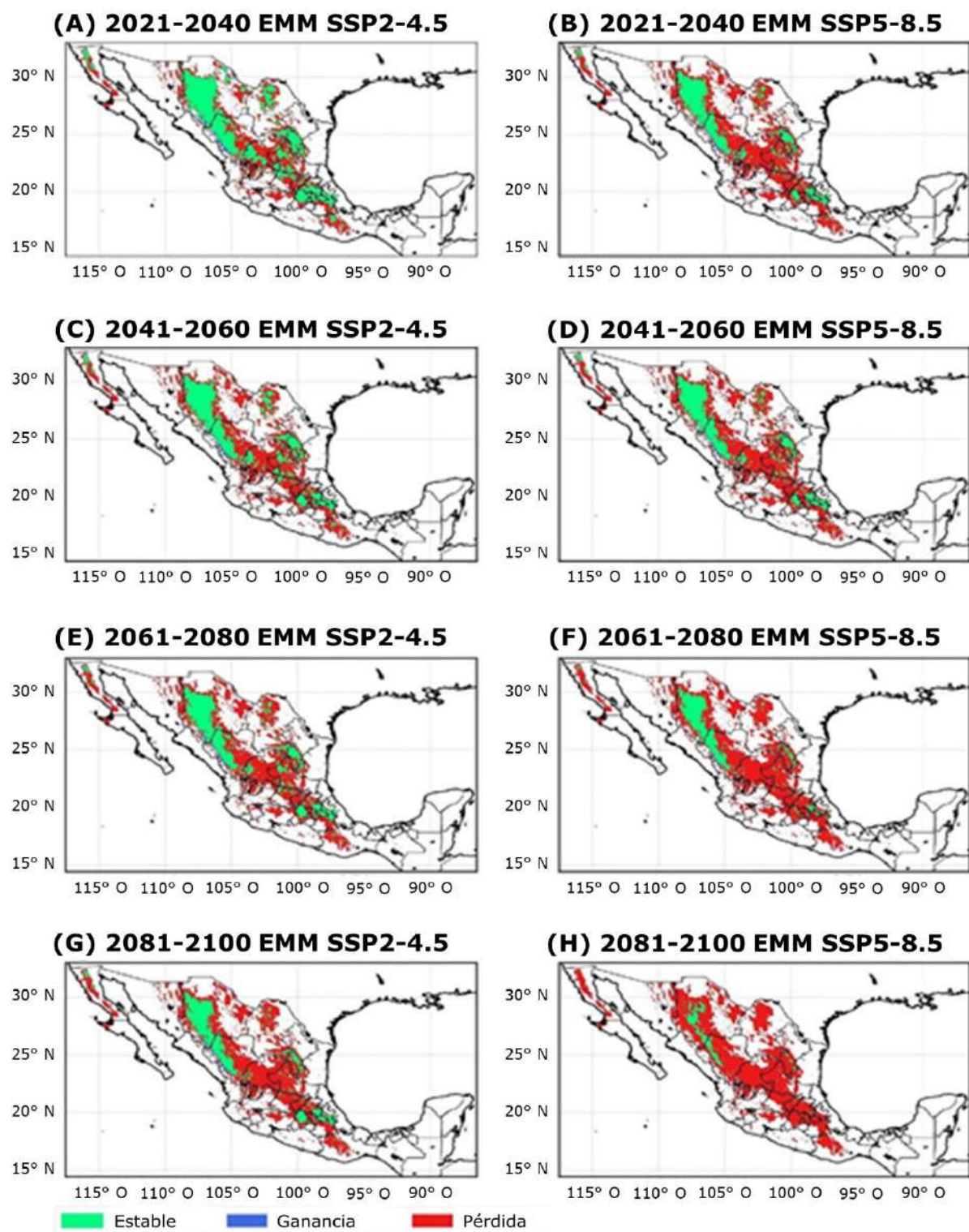


Figura 4. Cambios en la distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. de acuerdo con el Ensamble Multi-Modelo (EMM).

Durante 2021-2040, *P. cembroides* mantendría parte de su distribución en Chihuahua y Nuevo León bajo ambos escenarios (Figura 4A y 4B). Se proyecta además la aparición de nuevas áreas idóneas en Baja California (Sierra de Juárez) y Durango en 2021-2040 y 2041-2060 (Figura 4A y 4C). Estas áreas tenderían a desplazarse hacia altitudes mayores en los años 2081-2100 y podrían desaparecer bajo SSP5-8.5 (Figura 4H).

Las áreas de ganancia representan <5 % de la superficie total, lo que evidencia un potencial de expansión muy limitado. En contraste, las zonas estables abarcan entre 40 y 64 % durante la mayor parte del periodo, lo que indica su persistencia por algunas décadas; sin embargo, bajo SSP2-4.5 su proporción desciende por debajo de 50 % a partir de 2041-2060 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cambios (%) en el área de distribución de *Pinus cembroides* Zucc. a corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060), largo plazo (2061-2080) y muy largo plazo (2081-2100) en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de acuerdo con el Ensamble Multi-Modelo (EMM).

Periodo	SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	P	E	G	P	E	G
2021-2040	-36.5	63.5	+1.2	-37.1	62.9	+1.2
2041-2060	-50.3	49.6	+0.5	-59.2	40.7	+0.5
2061-2080	-56.0	43.9	+0.7	-73.6	26.4	+0.3
2081-2100	-65.3	34.7	+0.7	-90.3	9.7	+0.1

P = Pérdida; E = Estable; G = Ganancia.

Los escenarios CMIP6 proyectan una contracción más severa del hábitat de *P. cembroides* en comparación con estimaciones equivalentes bajo CMIP5 (Gómez-Díaz et al., 2011), particularmente en el escenario SSP5-8.5. En este último, se anticipa un incremento de la temperatura media regional de 4.0-4.5 °C hacia 2081-2100 (Almazroui et al., 2021), lo que intensificaría las variables bioclimáticas *Bio 8* y *Bio 9*

en el norte y centro de México. Como consecuencia, se prevé un aumento del estrés hídrico de la especie asociado con mayores déficits de humedad y evapotranspiración, lo que afectaría negativamente su crecimiento y capacidad adaptativa (Manzanilla-Quijada & Treviño-Garza, 2024).

No obstante, se proyecta la persistencia de áreas estables en la Sierra Madre Oriental y Occidental, así como la aparición de nuevas zonas de idoneidad limitada en Baja California, Coahuila, Nuevo León y Puebla. Estos patrones coinciden con estudios basados en CMIP5 (Romero-Sánchez *et al.*, 2017), lo que sugiere la presencia de posibles refugios climáticos para la especie pese a los impactos adversos del cambio climático.

El centroide de la idoneidad climática actual de *P. cembroides* (Figura 5), localizado en torno a 25.2° N y 103.8° O, muestra una tendencia consistente de desplazamiento hacia el noroeste a lo largo del siglo XXI en ambos escenarios. Bajo SSP2-4.5, el corrimiento proyectado es de ~40-50 km hacia finales de siglo (2081-2100), mientras que en SSP5-8.5 alcanza 70-80 km. Incluso hacia mediados de siglo ya se evidencia un desplazamiento significativo bajo SSP5-8.5 (~40 km en 2041-2060) frente al proyectado bajo SSP2-4.5 (~20 km). Este patrón coincide con la pérdida de áreas idóneas en regiones del sur y de menor altitud, y con la persistencia de refugios climáticos en latitudes y elevaciones mayores.

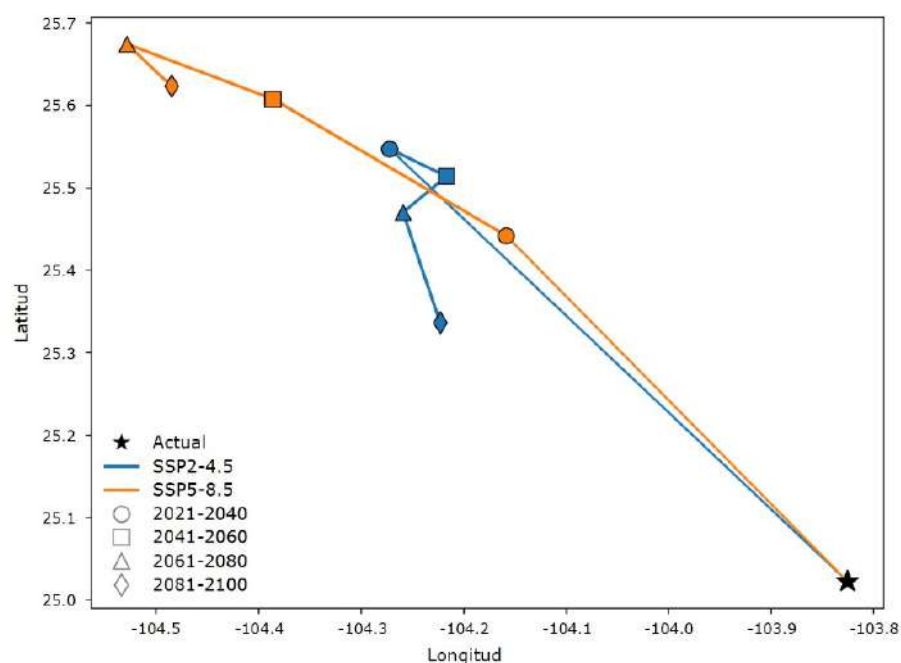


Figura 5. Centroide de la distribución de *Pinus cembroides* Zucc. bajo condiciones climáticas futuras.

Implicaciones para la conservación

La migración de especies es un proceso natural que ocurre gradualmente a lo largo de múltiples generaciones (Klisz et al., 2023). No obstante, la velocidad del cambio climático en las últimas décadas supera la capacidad natural de dispersión y adaptación de muchas especies y ecosistemas. Cuando las condiciones ambientales se modifican más rápido de lo que las especies pueden ajustarse, la persistencia de *P. cembroides* y de otras especies con rasgos ecológicos similares se compromete (Aitken et al., 2008).

En este contexto, la migración asistida (MA) ha emergido como una estrategia de manejo para facilitar el establecimiento de poblaciones en hábitats con condiciones climáticas futuras más favorables (Bower et al., 2024; Palik et al., 2022). En el caso de *P. cembroides*, trasladar genotipos hacia regiones más septentrionales o de

mayor altitud podría anticiparse a la pérdida de poblaciones locales y favorecer la colonización de áreas identificadas por los modelos como refugios climáticos. La efectividad de la MA depende de protocolos rigurosos de selección de material genético (por ejemplo, procedencias de ambientes más cálidos y secos), pruebas de establecimiento y monitoreo adaptativo que permitan ajustar densidades, tratamientos silvícolas y mezclas genéticas en función del desempeño (Palik et al., 2022). Paralelamente, resulta prioritario proteger las localidades que funcionarían como refugios naturales —particularmente en las cumbres de la Sierra Madre Occidental y Oriental, donde se proyecta idoneidad persistente—, dado que en ellas podría concentrarse la diversidad genética remanente de la especie hacia finales de siglo (Haire et al., 2022).

Además de la protección *in situ*, mantener y restaurar la conectividad ecológica entre fragmentos de hábitat actuales y futuros es crucial para reducir costos demográficos y genéticos durante los desplazamientos. El establecimiento de corredores biológicos que vinculen poblaciones remanentes con áreas de refugio proyectadas facilitaría la migración natural de *P. cembroides* a lo largo de gradientes altitudinales y latitudinales; con ello se incrementan sus posibilidades de persistencia y se mantiene el flujo génico entre subpoblaciones (Cantú-Garza, 2015). Estas acciones de conectividad tienden a generar co-beneficios para especies co-ocurrentes, lo cual favorece la integridad ecológica del paisaje frente al cambio climático (Mawdsley et al., 2009).

Las áreas naturales protegidas (ANP) son nodos críticos para sostener estos procesos. Además de conservar hábitats clave, pueden funcionar como “puentes” a lo largo de gradientes ambientales y facilitar el desplazamiento hacia zonas climáticamente más favorables (Chacón-Prieto et al., 2021). Sin embargo, su efectividad futura puede limitarse, si los nichos climáticos se desplazan fuera de sus límites (Aguirre-Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010). Por ello, es estratégico incorporar proyecciones climáticas en la planificación sistemática de la conservación, crear nuevas ANP o ampliar las existentes en zonas identificadas como refugios, y fortalecer la conectividad mediante corredores altitudinales y latitudinales que enlacen poblaciones remanentes con

refugios proyectados (Mawdsley et al., 2009). Estas acciones beneficiarían también a numerosas especies co-ocurrentes, contribuyendo a la integridad ecológica del paisaje.

Desde el manejo forestal, los resultados orientan políticas y programas de restauración focalizados en sitios prioritarios. Identificar áreas de pérdida potencial y futuros refugios permite dirigir la reforestación y el manejo adaptativo hacia altitudes mayores, que adquirirían relevancia como últimos reductos de *P. cembroides*. En estos sitios, la restauración con plántulas de especies nativas tolerantes a la sequía y la incorporación de genotipos provenientes de poblaciones de zonas áridas incrementarían la resiliencia ante condiciones más cálidas y secas (Palik et al., 2022). Esas medidas pueden articularse con instrumentos nacionales —como la Estrategia Nacional de Restauración Ecológica, programas de adaptación de Conafor y esquemas de pagos por servicios ambientales (Conafor, 2020)— siempre bajo protocolos rigurosos para la selección de material genético, monitoreo posterior y evaluación de riesgos (por ejemplo, alteración de comunidades receptoras o baja sobrevivencia por limitantes edáficas o bióticas no representadas en los modelos).

Conclusiones

El modelo *MaxEnt*, combinado con datos climáticos de alta resolución de *CHELSA* v2.1 y un Ensamble Multi-Modelo (EMM) del CMIP6, indica una reducción significativa del área de distribución de *P. cembroides* en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 a lo largo del siglo XXI, con una contracción más severa bajo SSP5-8.5. En este último, se estima que hacia finales de siglo persistirá únicamente alrededor de 10 % de las áreas actualmente idóneas, restringidas principalmente a zonas montañosas. Las temperaturas del

trimestre más seco (*Bio 9*) y del trimestre más húmedo (*Bio 8*) se identificaron como los principales factores climáticos que limitan la distribución de la especie en México.

El enfoque metodológico empleado contribuye a disminuir la incertidumbre en las proyecciones y facilita la identificación de corredores ecológicos y refugios climáticos potenciales. Esta información constituye un insumo clave para el diseño de estrategias de adaptación —incluida la migración asistida— y para la implementación de planes de conservación y manejo forestal orientados a la resiliencia de *P. cembroides* frente al cambio climático en México.

La implementación de estas medidas exige protocolos rigurosos de selección genética y evaluación ecológica, así como la coordinación entre la comunidad científica, autoridades gubernamentales y actores locales. Además, deben considerarse los riesgos asociados, como la alteración de comunidades receptoras o la baja viabilidad de poblaciones trasplantadas ante limitantes edáficas o bióticas no contempladas en los modelos climáticos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (actualmente Secretaría de Ciencias, Humanidades. Tecnología e Innovación) por el apoyo a la beca del primer autor. A la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo por facilitar sus instalaciones para la realización del trabajo de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses. Eduardo Alanís Rodríguez declara no haber participado en ninguna etapa del proceso editorial del manuscrito.

Contribución por autor

Julio Nemorio Martínez-Sánchez, Homero Alejandro Gárate-Escamilla y Gerardo Cuéllar-Rodríguez: búsqueda de información, modelización de la distribución potencial, revisión de datos, redacción del manuscrito; Tereza Cavazos: bases de datos climáticas, revisión del manuscrito; Wibke Himmelsbach, Eduardo Alanís Rodríguez y José Israel Yerena Yamallel: revisión del manuscrito.

Referencias

- Aguirre-Gutiérrez, J., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 875-882. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2010.003.657>
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M. A., Diallo, I., O'Brien, E., Ashfaq, M., Martínez-Castro, D., Cavazos, T., Cerezo-Mota, R., Tippet, M. K., Gutowski Jr., W. J., Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G., Vichot-Llano, A., Campbell, J. D., Kamil, S., ... Barlow, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(1), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Bobrowski, M., Weidinger, J., & Schickhoff, U. (2021). Is new always better? Frontiers in global climate datasets for modeling treeline species in the Himalayas. *Atmosphere*, 12(5), Article 543. <https://doi.org/10.3390/atmos12050543>

- Booth, T. H. (2022). Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology*, 47(7), 1506-1514. <https://doi.org/10.1111/aec.13234>
- Bower, A. D., Frerker, K. L., Pike, C. C., Labonte, N. R., Palik, B. J., Royo, A. A., Anderson, S. M., Ferreira, A. R., & Brandt, L. A. (2024). A practical framework for applied forestry assisted migration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, Article 1454329. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1454329>
- Cantú-Garza, A. (2015). *Identificación de refugios climáticos utilizando modelos de distribución potencial para el Noreste de México* [Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas Ambientales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/328891064_Identificacion_de_refugios_climaticos_utilizando_modelos_de_distribucion_potencial_para_el_Noreste_de_Mexico
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., & Li, Y. (2018). Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees*, 32, 1387-1399. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1720-1>
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda-Martínez, L. F., & Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396-1420. <https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- Chacón-Prieto, F., Rodríguez-Soto, C., Cuervo-Robayo, A. P., Carbajal-Monroy, J. C., & Alagador, D. (2021). Protected areas in Central Mexico—are they fit in promoting species persistence under climate and land use changes? *Biological Conservation*, 260, Article 109186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109186>
- CHELSEA. (2025). CHELSA: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas [Data sets]. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. <https://chelsa-climate.org/>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., De Grau, P., & Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer

drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699-5716.
<https://doi.org/10.1002/joc.5773>

Comisión Nacional Forestal. (2018). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos* [Base de datos]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<https://snmf.cnf.gob.mx/infys/>

Comisión Nacional Forestal. (2020, 16 de enero). *Apoyos CONAFOR*. Gobierno de México, México. <https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/apoyos-conafor>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de México* [Base de datos]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.snib.mx/>

Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H., & Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
<https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/685>

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García-Marquéz, J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>

Earth System Grid Federation. (2025). *Data search results have changed, see News for details ESGF CMIP6 search* [Data MetaGrid]. Earth System Grid Federation.
<https://aims2.llnl.gov/search/cmip6/>

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>

Escobar, L. E., Lira-Noriega, A., Medina-Vogel, G., & Townsend-Peterson, A. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the

- Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221-229. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- García, E., & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1998). *Climas. Catálogo de metadatos geográficos* [Conjunto de metadatos]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>
- Geng, W., Li, Y., Sun, D., Li, B., Zhang, P., Chang, H., Rong, T., Liu, Y., Shao, J., Liu, Z., Zhu, H., Lou, Y., Wang, Q., & Zhang, J. (2022). Prediction of the potential geographical distribution of *Betula platyphylla* Suk. in China under climate change scenarios. *PLoS ONE*, 17(3), Article e0262540. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262540>
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., Toledo-Medrano, M. L., Conde-Álvarez, C., & Gay-García, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. *Atmósfera*, 24(1), 31-52. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/23801>
- Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Ortega-Rodríguez, J. M., Blanco-García, A., Madrigal-Sánchez, X., Lindig-Cisneros, R., Lopez-Toledo, L., Pedraza-Santos, M. E., & Rehfeldt, G. E. (2020). Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecological Applications*, 30(2), Article e02041. <https://doi.org/10.1002/eap.2041>
- Gutiérrez-García, J. V., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., García-Díaz, S., & Romo-Lozano, J. L. (2015). Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. *Agrociencia*, 49(2), 205-219. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1141>
- Haire, S. L., Villarreal, M. L., Cortés-Montaña, C., Flesch, A. D., Iniguez, J. M., Romo-Leon, J. R., & Sanderlin, J. S. (2022). Climate refugia for *Pinus* spp. in topographic and bioclimatic environments of the Madrean sky islands of México and the United States. *Plant Ecology*, 223, 577-598. <https://doi.org/10.1007/s11258-022-01233-w>

- Hansen, A. J., & Phillips, L. B. (2015). Which tree species and biome types are most vulnerable to climate change in the US Northern Rocky Mountains? *Forest Ecology and Management*, 338, 68-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.008>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623-642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023a). SPM - Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, & N. Caud, (Eds.), *Climate Change 2021 - The physical science basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023b). *Climate Change 2023. Synthesis Report* (H. Lee & J. Romero, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, Article 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Karger, D. N., Chauvier, Y., & Zimmermann, N. E. (2023). chelsa-cmip6 1.0: a python package to create high resolution bioclimatic variables based on CHELSA ver. 2.1 and CMIP6 data. *Ecography*, 2023(6), Article e06535. <https://doi.org/10.1111/ecog.06535>
- Klisz, M., Chakraborty, D., Cvjetković, B., Grabner, M., Lintunen, A., Mayer, K., George, J.-P., & Rossi, S. (2023). Functional traits of boreal species and adaptation to local conditions. In M. Montoro-Girona, H. Morin, S. Gauthier & Y. Bergeron (Eds.), *Boreal forests in the face of climate change. Sustainable Management* (pp. 323-355). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_12

- Knutti, R., Sedláček, J., Sanderson, B. M., Lorenz, R., Fischer, E. M., & Eyring, V. (2017). A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. *Geophysical Research Letters*, 44(4), 1909-1918. <https://doi.org/10.1002/2016GL072012>
- Manzanilla-Quijada, G. E., & Treviño-Garza, E. J. (2024). Posibles efectos del cambio climático en la distribución potencial de especies arbóreas de bosque templado en Nuevo León, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), Artículo e4189. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4189>
- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), Artículo e2521804. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804>
- Martínez-Sánchez, J. N., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Yerena-Yamallel, J. I., Cavazos, M. T., & Gárate-Escamilla, H. A. (2023). Comparación de bases de datos climáticos en la modelación de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 135-158. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1350>
- Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, 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 greggi* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest*, 13(5), 426-434. <https://doi.org/10.3832/ifor3491-013>
- Mawdsley, J. R., O'Malley, R., & Ojima, D. S. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 23(5), 1080-1089. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01264.x>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP)

- for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461-3482.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Palik, B. J., Clark, P. W., D'Amato, A. W., Swanston, C., & Nagel, L. (2022). Operationalizing forest-assisted migration in the context of climate change adaptation: Examples from the eastern USA. *Ecosphere*, 13(10), Article e4260.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.4260>
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Peterson, A. T. (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>
- Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
<https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- QGIS. (2020). *QGIS Geographic Information System* (Version 3.16.0) [Computer software]. QGIS Association. <https://qgis.org>
- Romero-Sánchez, M. E., González-Hernández, A., Pérez-Miranda, R., Velasco-Bautista, E., & Moreno-Sánchez, F. (2017). Efecto del cambio climático a nivel local en la distribución potencial de cuatro especies forestales de la cuenca Río Bravo-San Juan, Coahuila, México. *Agroproductividad*, 10(8), 42-47. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1073>
- Sáenz-Romero, C., Lamy, J.-B., Ducousso, A., Musch, B., Ehrenmann, F., Delzon, S., Cavers, S., Chałupka, W., Dağdaş, S., Hansen, J. K., Lee, S. J., Liesebach, M., Rau, H.-M., Psomas, A., Schneck, V., Steiner, W., Zimmermann, N. E., & Kremer, A. (2017). Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global Change Biology*, 23(7), 2831-2847.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13576>

- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961–1990 and future climate. *Botanical Sciences*, 93(4), 709–718. <http://dx.doi.org/10.17129/botsoci.86>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Stewart, S. B., Fedrigo, M., Kasel, S., Roxburgh, S. H., Choden, K., Tenzin, K., Allen, K., & Nitschke, C. R. (2022). Predicting plant species distributions using climate-based model ensembles with corresponding measures of congruence and uncertainty. *Diversity and Distributions*, 28(5), 1105–1122. <https://doi.org/10.1111/ddi.13515>
- Téllez-Valdés, O., Miguel-Talonia, C., Suárez-Mota, M. E., Álvarez-Espino, R. X., & Hernández-Moreno, M. M. (2019). *Distribución potencial de las especies Pinaceae (Pinus) y Fagaceae (Quercus) de México* [Informe final SNIB-CONABIO proyecto JM010]. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfJM010.pdf>
- Thuiller, W., Guéguen, M., Renaud, J., Karger, D. N., & Zimmerman, N. E. (2019). Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. *Nature Communications*, 10, Article 1446. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09519-w>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123–318. <http://dx.doi.org/10.3354/cr00953>
- Zhong, X., Zhang, L., Zhang, J., He, L., & Sun, R. (2023). Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of *Castanopsis carlesii* under various climate change scenarios in China. *Forests*, 14(7), Article 1397. <https://doi.org/10.3390/f14071397>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.