

EFEITO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES DE CLIMA TEMPLADO EN OAXACA, MÉXICO

● JUAN CARLOS GUZMÁN-SANTIAGO^{1,5}, ● HÉCTOR MANUEL DE LOS SANTOS-POSADAS¹, ● GREGORIO ÁNGELES-PÉREZ¹,
● BENEDICTO VARGAS-LARRETA^{2*}, ● MARTÍN GÓMEZ-CÁRDENAS^{3,5}, ● GERARDO RODRÍGUEZ-ORTIZ⁴,
● ROGELIO OMAR CORONA-NÚÑEZ^{6,7}

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

² Tecnológico Nacional de México/Campus El Salto, Durango, México.

³ Campo Experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Michoacán, México.

⁴ Tecnológico Nacional de México/Campus Valle de Oaxaca, Xoxocotlán, Oaxaca, México

⁵ Centro de Investigación, Divulgación y Asesoría Técnica Forestal y Agropecuaria (SC), Tlaxiaco, Oaxaca, México.

⁶ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

⁷ Procesos y Sistemas de Información en Geomática, SA de CV, Tlalnepantla, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: bvargas@itelsalto.edu.mx

Resumen:

Antecedentes: El cambio climático es cada vez más evidente y los modelos de distribución son herramientas que permiten predecir el efecto que este podría causar en la biodiversidad.

Hipótesis: Ante escenarios de cambio climático, las especies de bosques templados de los géneros *Pinus* y *Quercus* presentarán reducciones en su área de distribución y cambios en su patrón espacial.

Especies de estudio: *Arbutus xalapensis*, *Clethra mexicana*, *Pinus devoniana*, *Pinus oocarpa*, *Pinus teocote*, *Quercus acutifolia*, *Quercus castanea*, *Quercus crassifolia*, *Quercus elliptica*, *Quercus magnoliifolia* y *Quercus rugosa*.

Sitio de estudio: Oaxaca.

Métodos: Se construyeron dos escenarios, optimista (SSP-1 y RCP 2-6) y pesimista (SSP-5 y RCP 8.5) a los años 2030 y 2090. Se utilizaron 1,383 registros y ocho variables bioclimáticas en conjunto con siete algoritmos de aprendizaje evaluados mediante las métricas ROC y TSS.

Resultados: Se obtuvo un modelo de conjunto en el cual las variables que más contribuyeron fueron la precipitación del trimestre más húmedo, la temperatura media anual, la temperatura mínima del mes más frío y el rango de temperatura anual. Las especies que mostraron mayor valor de ROC fueron *Clethra mexicana* (0.91) y *Arbutus xalapensis* (0.89) con los valores de TSS de 0.68 y 0.60, respectivamente.

Conclusiones: Sin importar el escenario, para el año 2090 todas las especies de *Pinus* y *Quercus* reducirán su distribución potencial, por lo que es urgente establecer políticas de conservación.

Palabras clave: estrategia de conservación, modelos climáticos, nicho ecológico, *Pinus*, *Quercus*.

Abstract

Background: Climate change is becoming more evident, and distribution models are useful tools to predict the effect it might cause on biodiversity.

Hypotheses: Under climate change scenarios, temperate forests species of the genus *Pinus* and *Quercus* will undergo reductions in their distribution area and changes in their spatial pattern.

Studied species: *Arbutus xalapensis*, *Clethra mexicana*, *Pinus devoniana*, *Pinus oocarpa*, *Pinus teocote*, *Quercus acutifolia*, *Quercus castanea*, *Quercus crassifolia*, *Quercus elliptica*, *Quercus magnoliifolia* and *Quercus rugosa*.

Study site: Oaxaca

Methods: Two scenarios were constructed, an optimistic one (SSP-1 and RCP 2-6) and a pessimistic one (SSP-5 and RCP 8.5) for the years 2030 and 2090. A total of 1,383 records and eight bioclimatic variables were used, along with seven learning algorithms, evaluated using ROC and TSS metrics.

Results: An ensemble model was obtained, in which the most important contributing variables were precipitation of the wettest quarter, mean annual temperature, minimum temperature of the coldest month and annual temperature range. The species that showed the highest ROC values were *Clethra mexicana* (0.91) and *Arbutus xalapensis* (0.89) with TSS values of 0.68 and 0.60, respectively.

Conclusions: Regardless of the scenario, by the year 2090 all species of *Pinus* and *Quercus* will reduce their potential distribution. Therefore, it is urgent to establish conservation policies.

Keywords: conservation strategy, climate models, ecological niche, *Pinus*, *Quercus*.

Anivel global, se reconoce que el cambio climático (CC) ha provocado cambios a largo plazo en las temperaturas y patrones climáticos (IPCC 2021). El CC es un fenómeno global que altera los patrones del clima y ha generado preocupación mundial por la velocidad a la que se produce (Nieves 2020). La variación de la precipitación y el aumento de la temperatura afectarán de manera directa a la humanidad y también modificará la fenología, distribución y abundancia de los bosques en un futuro (Gutiérrez & Trejo 2014, Manzanilla-Quijada *et al.* 2020). Esto obligará a que algunas especies migren, mientras otras mejorarán su capacidad de adaptación y aumentarán su área de distribución (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016) o su rango altitudinal (Lenoir *et al.* 2008); incluso, algunas se extinguirán (Freeman *et al.* 2018). Además, el CC provocará una disminución de la disponibilidad de agua dulce, una mayor recurrencia de incendios forestales (Corona-Núñez & Campo 2022), aparición de plagas y enfermedades y, por ende, aumento en la mortalidad de árboles (Anderegg *et al.* 2013). Debido a este fenómeno, muchas especies serán incapaces de adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, afectando de forma severa aquellas ecológicamente más sensibles (Mendoza-Ponce *et al.* 2019), particularmente las que se encuentren en ecosistemas geográficamente confinados, como las montañas (Romero *et al.* 2016).

La modelación del nicho ecológico, también conocida como modelo de distribución de especies, es la herramienta más ampliamente utilizada para representar la distribución potencial de las especies a través del reconocimiento de las características específicas de cada una de estas. Diferentes estudios han mostrado la capacidad de reproducir la distribución potencial de las especies a través del uso de variables bioclimáticas (Guisan & Zimmermann 2000), que en conjunto con los modelos de circulación general (MCG), pueden ser proyectadas a futuro para entender los cambios en sus distribuciones potenciales (Jiménez-García & Peterson 2019, Manzanilla-Quijada *et al.* 2020). Los MCG incluyen modelos numéricos que brindan una descripción detallada del comportamiento de la atmósfera a nivel global, por lo que permiten realizar predicciones futuras del clima en algún lugar de interés (Rivera & Amador 2008). En la actualidad hay diversas aproximaciones metodológicas para realizar estos análisis, como BIOCLIM (Busby 1991), GARP (Stockwell 1999) y Maxent (Phillips *et al.* 2004).

En México se reconoce que el CC y el cambio de uso o cobertura del suelo son los principales responsables de la pérdida de servicios ecosistémicos y de biodiversidad a diversas escalas (Mendoza-Ponce *et al.* 2018, Mendoza-Ponce *et al.* 2019, Corona-Núñez *et al.* 2021). Por ejemplo, se estima que en México el aumento de la temperatura promedio será de 0.5 - 2 °C para el año 2030 y de 3.7 °C para 2090 (Sáenz-Romero *et al.* 2010, Mendoza-Ponce *et al.* 2018), y se prevé que estas condiciones promoverán no sólo la restricción de la distribución de especies forestales, principalmente del género *Pinus* (Gernandt & Pérez-De la Rosa 2014), y de vertebrados terrestres (Mendoza-Ponce *et al.* 2019), sino que se incrementarán los procesos de perturbación (Corona-Núñez *et al.* 2020, Mendoza-Ponce *et al.* 2020) vulnerando los ecosistemas de México.

Oaxaca es la entidad federativa con mayor diversidad a nivel nacional, destacando las especies de los bosques de clima templado (CONABIO 2022). Sin embargo, esta diversidad se encuentra amenazada por los efectos del CC (Mendoza-Ponce *et al.* 2018), cambio de uso del suelo (Mendoza-Ponce *et al.* 2018) e incendios forestales (Corona-Núñez *et al.* 2021). En particular, destacan las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* (Del Castillo *et al.* 2004), no solo por su importancia ecológica, sino por su valor para la población local. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de entender la influencia del CC en la distribución de las especies presentes en este tipo de bosque. Por tanto, el objetivo general del estudio fue proyectar los cambios de las distribuciones potenciales actuales y futuras de las especies de *Pinus* y *Quercus* más dominantes del estado de Oaxaca en el mediano y largo plazo.

Materiales y métodos

Área de estudio. El estado de Oaxaca se localiza en el sureste de la República Mexicana, entre las coordenadas extremas 18° 42' y 15° 39' de latitud norte, y 93° 52' y 98° 32' de longitud oeste; con una altitud máxima de 3,750 m snm. Tiene una extensión territorial de 95,354 km². Se divide en ocho regiones económicas: Cañada, Costa, Istmo, Mixteca, Papaloapan, Sierra Norte, Sierra Sur y Valles Centrales (INEGI 2023, Álvarez 1994) ([Figura 1](#)). Las regiones económicas de Oaxaca agrupan el territorio de acuerdo con características geográficas, culturales y económicas únicas.

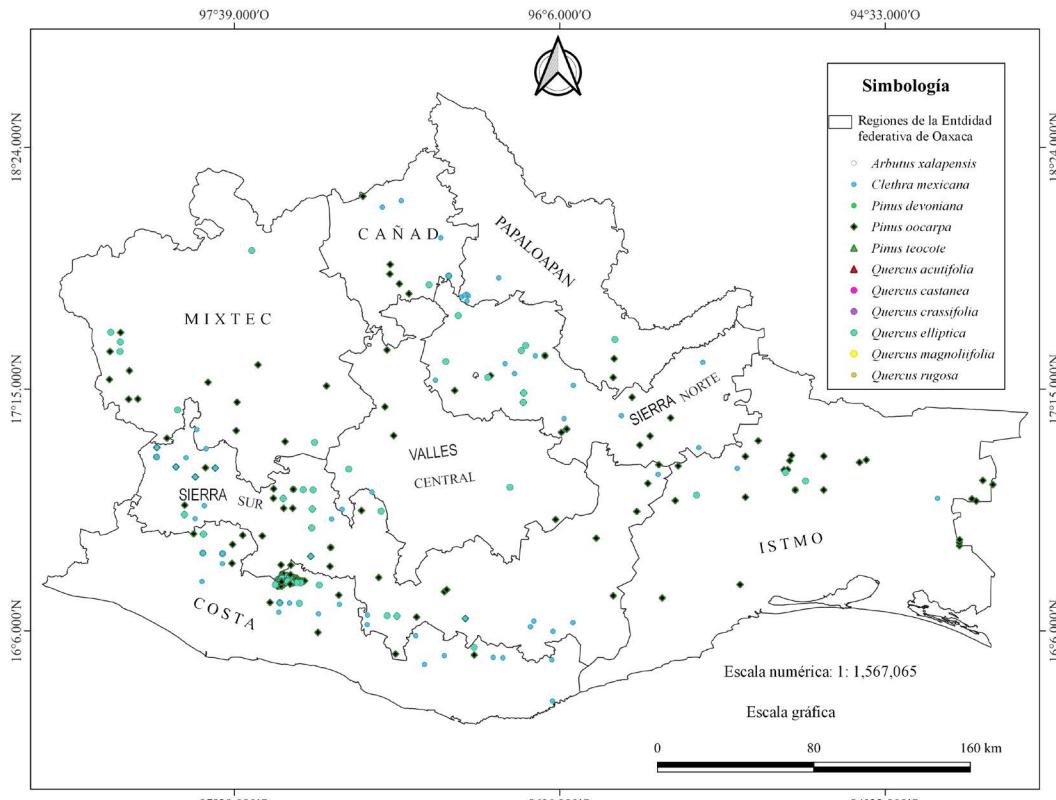


Figura 1. Área de estudio y registros de presencia de las especies evaluadas en las ocho regiones del estado de Oaxaca

Oaxaca es la entidad con mayor biodiversidad del país con 11 formaciones forestales que ocupan el 67.1 % (6.29 millones de ha) de su territorio, las cuales se distribuyen de la siguiente manera: coníferas (603,247 ha), coníferas y latifoliadas (1'524,088 ha), latifoliadas (742,401 ha), bosque mesófilo (536,576 ha), selvas altas y medianas (1'532,336 ha), selvas bajas (1'156,918 ha), manglar (30,635 ha), zonas semiáridas (25,980 ha), zonas áridas (27,284 ha), otras asociaciones (67,688 ha) y otras áreas forestales (48,320 ha) (CEF 2023).

Registros de las especies. Se realizó una revisión de registros botánicos en diferentes fuentes: el Inventario Forestal de San Juan Quiahije, Oaxaca (IF_SJQ), el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (CONAFOR 2022), el Global Biodiversity Information Facility (GBIF 2023) y el iNaturalist (www.inaturalist.org). En total se obtuvieron 2,200 registros de las 11 especies más con mayor distribución en el estado de Oaxaca (Tabla 1).

Con el fin de evitar una sobre representación por la presencia de esfuerzos de muestreos diferenciales, se realizó una agrupación de los registros. Esta consistió en la integración de múltiples observaciones registradas dentro de cada celda, como una sola observación. De esta forma, se mitigaron los sobre muestreos y se compensaron los esfuerzos de muestreos diferenciales. Las celdas son de tamaño regular de 1 km^2 (30 segundo de arco) y distribuidas de forma regular en toda la zona de estudio. El resultado de la agrupación fue 1,383 registros independientes ([Tabla 2](#)).

Selección de las variables bioclimáticas. Se utilizaron las 19 variables bioclimáticas de Worldclim 2 disponibles del año 2020, las cuales son consideradas como las condiciones del “clima actual” (Fick & Hijmans 2017). Las variables bioclimáticas se encuentran a una resolución de 1 km². Todas las variables bioclimáticas se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación, y representan tendencias anuales (temperatura y precipitación media anual), estacionalidad (rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos o limitantes (por ejemplo, temperatura de los meses más frío y el más cálido, y precipitación del trimestre más húmedo y el más seco) (Fick & Hijmans 2017); adicionalmente se utilizaron la altitud y la pendiente. La información altitudinal fue tomada

Efecto del cambio climático en especies forestales de Oaxaca

Tabla 1. Información biológica de las especies en estudio.

Especie	Descripción
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	Arbusto o árbol mediano de la familia Ericaceae; perennifolio, que alcanza los 3 m de altura. La corteza se desprende en capas delgadas. Sus hojas delgadas y resistentes de 2-18 cm son brillantes por encima y opacas por debajo. Las flores van de 7-9 mm de largo, son amarillas a blancas. El fruto es una baya roja globosa, menor a 1 cm de diámetro. Habita en bosques templados entre los 1,600 y 3,000 m snm.
<i>Clethra mexicana</i> DC	Árbol perennifolio de la familia Clethraceae, que puede llegar a medir hasta 25 m de altura, aunque con frecuencia solo de 8 a 15 m. Ramillas gruesas de tomento café-rojizo oscuro; pecíolos largos. Inflorescencia de 4 a 6 racimos largos, rectos o algo curvados, con filamentos relativamente largos y anteras oblongas o sagitadas. Suele ocupar claros de los bosques y ambientes alterados entre los 1,900 y 3,200 m snm.
<i>Pinus devoniana</i> Lindl.	Árbol de la familia Pinaceae; mide entre 20 y 30 m de altura, con copa irregular redondeada, corteza áspera y agrietada, ramas largas, colocadas irregularmente en el tallo, ramillas de color café oscuro muy ásperas. Tiene hojas de 30-35 cm, color verde claro brillante; conos de 20-30 cm de largo, de color moreno opaco; madera blanca amarillenta, dura y pesada. Habita desde los 900 hasta los 3,000 m snm en las montañas de clima templado.
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	Árbol que alcanza un tamaño de 15 a 25 m de altura, con el tronco grueso y la corteza gris o café-rojiza. Las hojas son de color verde olivo o verde pasto, y miden de 12 a 30 cm de largo. Tiene conos solitarios o en pares que se abren al madurar y son café amarillento o café rojizo. Los conos semilleros son ovoides con la base plana, miden 3 a 10 cm de largo por 3 a 12 cm de ancho. Se encuentra entre los 150 y 2,400 m snm.
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Árbol perennifolio que alcanza alturas de hasta 20 m. La corteza es fisurada de color café grisáceo. Las hojas de 10 a 15 cm y en fascículos de tres, rígidas de color verde oscuro y brillante. Los frutos son conos ovoides de 3.5 a 6.5 cm de largo, de color café claro a café rojizo. Habita entre los 1,000 y los 3,000 m snm.
<i>Quercus acutifolia</i> f. <i>abrupta</i> Trel.	Árbol caducifolio de hasta 12 m de altura, con un tronco de hasta 30 cm de diámetro. Las hojas son tiesas y coriáceas, rígidas, estrechamente elípticas, de hasta 16 cm de largo, de color verde oscuro por el haz y verde más claro por el envés. Crece en bosques de pino-encino entre los 600 y 2,440 m snm.
<i>Quercus castanea</i> Née	Árbol caducifolio de hasta 15 m de altura, con un tronco de hasta 80 cm de diámetro. Las hojas son gruesas y coriáceas, de hasta 11.6 cm de largo, elípticas y con numerosos dientes puntiagudos en los bordes. Se encuentra entre los 1,400 y 2,600 m snm, aunque también se ha encontrado en los 3,500 m.
<i>Quercus crassifolia</i> Benth.	Árbol de 8 a 20 m de altura, con diámetro de 25 a 50 cm; tiene corteza café obscura acanalada; las hojas son gruesas y coriáceas, miden 4-15 cm de largo y 2-10 cm de ancho, obovadas, en el haz color verde oscuro y glabras, envés verde amarillento. Frutos de tamaño medio, sobre un pedúnculo de 1-2 cm de largo y 3-4 mm de ancho. Se encuentra en bosques de pino-encino húmedos en altitudes de 1,900 a 2,800 m.
<i>Quercus elliptica</i> Newberry	Árbol que mide de 5 a 15 m de alto, con la corteza áspera, gris a negra, con hojas elípticas o ovadas, (4.5-) 6-15 cm de largo y 3.5-5 cm de ancho, con inflorescencias pistiladas de 7-15 mm de largo, con 1-3 flores; frutos de 1 a 3. Crece en bosques de pino y encino entre los 700 y 2,300 m snm.

Especie	Descripción
<i>Quercus magnoliifolia</i> Née	Árbol caducifolio de hasta 20 m de altura, con un tronco de hasta 60 cm de diámetro. Las hojas son gruesas y coriáceas, de hasta 22 cm de largo, ampliamente ovoideas, con bordes ondulados, verdes por el haz, pero cubiertas de vellosidad amarillenta por el envés. Se encuentra en altitudes que van de 300 a 2,000 m.
<i>Quercus rugosa</i> Née	Árbol o arbusto bajo (3-8 m), aunque excepcionalmente alcanza los 30 m de altura. Corteza oscura con profundas fisuras que forman escamas; sus hojas son elíptico-ovadas de margen entero o a veces aserrado, muy rígidas al madurar y notablemente cóncavas por el envés. El fruto es una bellota ovoide pequeña (15-25 mm de largo), angosta y puntiaguda. Crece preferentemente en laderas y barrancas con clima templado subhúmedo, entre los 1,800 y 2,800 m snm.

Fuente: <https://www.inaturalist.org>

de Worldclim, mientras que el cálculo de la pendiente se derivó de la información altitudinal a través del uso de la librería ráster en R (R Core Team 2022).

La información climática futura se basó en dos escenarios, el optimista y el pesimista. El escenario optimista integra la trayectoria socioeconómica compartida 1 (SSP-1, por sus siglas en inglés) y la trayectoria representativa de concentración 2.6 (RCP-2.6, por sus siglas en inglés); mientras que para el escenario pesimista se empleó el escenario SSP-5 y RCP-8.5. La información climática futura se basó en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés). El modelo de circulación general (MCG) seleccionado fue el CNRM-CM6-1.

Tabla 2. Registros de presencia de las especies evaluadas.

Especies	IF_SJQ	INFyS	GBIF	iNaturalist	Registros
<i>Arbutus xalapensis</i>	14	144	57	87	302
<i>Clethra mexicana</i>	41	57	6	4	108
<i>Pinus devoniana</i>	11	31	8	7	57
<i>Piuns oocarpa</i>	63	78	11	20	172
<i>Pinus teocote</i>	24	23	0	20	67
<i>Quercus acutifolia</i>	47	51	11	9	118
<i>Quercus castanea</i>	13	32	25	24	94
<i>Quercus crassifolia</i>	17	61	0	24	102
<i>Quercus elliptica</i>	39	37	0	5	81
<i>Quercus magnoliifolia</i>	14	86	14	15	129
<i>Quercus rugosa</i>	13	54	24	62	153
Total	296	654	156	277	1,383

Con el fin de evitar la colinealidad entre las variables explicativas, se realizó un análisis de correlación de Pearson (r) y se calculó el Factor de Inflación de Varianza (VIF). Cuando algún par de variables resultó con $r \geq |0.7|$ o $VIF \geq 10$ una de las variables fue eliminada de los análisis posteriores, donde la variable que se retuvo fue aquella que mostraba la menor complejidad conceptual para su interpretación.

Modelación de la distribución de las especies. A partir de los registros totales de los individuos ($n = 1,383$) se realizó la construcción de los modelos de distribución de cada una de las especies. Adicionalmente, se construyeron las

pseudo-ausencias a través de la generación de 1,000 puntos aleatorios a una distancia > 5 km a la observación real más cercana (Barbet-Massin *et al.* 2012). El 70 % de las observaciones (reales y pseudo-ausencias) se utilizó para calibrar los modelos y el 30 % restante para la validación de los mismos (Xu *et al.* 2021). En esta fase de la modelación se utilizó la técnica denominada *discriminante*, dado que se emplean datos de presencia y ausencia de las especies para la generación de los modelos. Para esto se requieren datos paralelos (pseudo-ausencias) para contrastar la información de campo mediante la generación de puntos aleatorios sin considerar la distribución potencial de las especies (Barbet-Massin *et al.* 2012).

Se realizaron siete modelaciones geoestadísticas; cuatro correspondieron a los modelos de regresión Modelo Lineal Generalizado (GLM), Modelo Aditivo Generalizado (GAM), Modelo Potencial o Boosted Generalizado (GBM) y Spline Adaptativo Multivariado (MARS), y tres a los algoritmos de aprendizaje automático Entropía Máxima (MAXENT.Phillips.2), Random Forest (RF) y Red Neuronal Artificial (ANN). Para cada una de las siete modelaciones se realizaron diez replicas con observaciones seleccionadas de forma aleatoria. Luego, los resultados de cada una de las modelaciones fueron agregados a través del cálculo de la media, aproximación similar utilizada por otros autores (Corona-Núñez *et al.* 2017).

Posteriormente, se utilizó el modelo de conjunto, que es definido como la integración de las diferentes modelaciones dentro de un solo conjunto. Algunos autores han demostrado que la integración de múltiples resultados de diferentes modelos promueve una mayor coincidencia entre las observaciones reales y los modelos (Corona-Núñez *et al.* 2017, Corona-Núñez *et al.* 2021, Altamirano-del Carmen *et al.* 2021). La construcción del modelo de conjunto usó un umbral de 0.8 como condición para la exclusión de las modelaciones individuales. Los valores del modelo de conjunto oscilan entre 0 y 1, de tal forma que el más próximo a 1 indica las porciones del territorio donde existe una mayor probabilidad de ocurrencia de la especie, mientras que valores cercanos a 0 son zonas donde hay una exclusión de la especie (Allouche *et al.* 2006). Esta aproximación se realizó para el año 2030 y 2090, correspondientes a los períodos 2021-2040 y 2081-2100, respectivamente. La validación del modelo final se basó en el cálculo de la característica operativa relativa (ROC por sus siglas en inglés) y la estadística de habilidad real (TSS por sus siglas en inglés) (Allouche *et al.* 2006). Todas las modelaciones se realizaron mediante la librería Biomod2 v4.2-2 en R (R Core Team 2022).

Resultados

La modelación por especie indicó que el valor de ROC oscila de 0.74 a 0.91, mientras que de TSS fue de 0.37 a 0.69 ([Tabla 3](#)). Las especies que mostraron el mayor poder predictivo fueron *Clethra mexicana* y *Arbutus xalapensis*, mientras que las especies que mostraron el menor poder predictivo fueron *Quercus castanea* y *Pinus teocote*.

Distribución actual y variables bioclimáticas dominantes. La distribución de las especies se relacionó principalmente con la variabilidad de la temperatura (Bio 6 y Bio 7) y de la precipitación (Bio16) ([Tabla 4](#)). La altitud mostró una correlación con la temperatura media anual. La pendiente no mostró poder predictivo para restringir la distribución de las especies.

Las especies modeladas en su conjunto cubren casi la totalidad del territorio del Estado; sin embargo, la distribución de cada una difiere en función de las características bioclimáticas locales ([Figura 2](#)). Las especies con mayor representación en el Estado fueron *Pinus devoniana* (53.3 %), *Clethra mexicana* (42.1 %), *Quercus acutifolia* (38.6 %), *Q. rugosa* (36.9 %) y *P. oocarpa* (36.6 %); mientras que *P. teocote* y *Q. crassifolia* fueron las de menor distribución.

Escenarios de distribución de las especies para el periodo 2021-2040. Con base en el escenario optimista, se estima que en el año 2030 ocho de las 11 especies presentarán una disminución de la superficie potencial que pudieran ocupar ([Figura 3](#); [Tabla 5](#)). La expansión de estas especies se registra en las ocho regiones del Estado; sin embargo, la región Mixteca es donde se observa la mayor reducción del potencial de distribución de especies,

Tabla 3. Evaluación estadística del modelo de conjunto.

EspecieS	ROC	TSS
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.89	0.60
<i>Clethra mexicana</i>	0.91	0.69
<i>Pinus devoniana</i>	0.86	0.59
<i>Pinus oocarpa</i>	0.87	0.57
<i>Pinus teocote</i>	0.75	0.39
<i>Quercus acutifolia</i>	0.80	0.50
<i>Quercus castanea</i>	0.74	0.37
<i>Quercus crassifolia</i>	0.77	0.44
<i>Quercus elliptica</i>	0.85	0.56
<i>Quercus magnoliifolia</i>	0.89	0.60
<i>Quercus rugosa</i>	0.85	0.57

Tabla 4. Variables ambientales empleadas en la modelación de la distribución potencial de las especies.

Clave	Descripción	Contribución
		(%)
Bio 1	Temperatura media anual (°C)	28
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)	25
Bio 7	Rango de temperatura anual (°C)	25
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido (°C)	19
Bio 11	Temperatura media del trimestre más frío (°C)	16
Bio 12	Precipitación anual (mm)	14
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)	33
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco (mm)	10

mientras que en las regiones Cañada y Cuenca del Papaloapan se estima que aumentará el número de especies. Las especies más afectadas serán *Pinus devoniana* y *P. oocarpa* para las cuales se estima una reducción en su distribución potencial de 42 y 32 %, respectivamente. Las especies que mostrarán las mayores expansiones en su distribución son *Quercus crassifolia* y *Q. castanea*, ya que pudieran expandir su distribución potencial en 305 y 503 %, respectivamente.

El escenario pesimista para el mismo año indica que siete de las 11 especies mostrarían una reducción en su distribución ([Figura 4](#); [Tabla 5](#)). Las especies más afectadas serán *Quercus castanea* y *Q. elliptica*, con una reducción estimada de 96 y 91 % de su superficie, respectivamente. Las especies con una reducción media serán *Quercus magnoliifolia*, *Q. crassifolia*, *Pinus teocote*, *Clethra mexicana* y *P. devoniana*, con una reducción estimada de 70, 66, 59, 58 y 45 %, respectivamente. Se considera que las demás especies tendrán variaciones poco significativas en su distribución (< 2 %).

El proceso de desplazamiento de las especies es diferencial. *Quercus castanea* y *Q. crassifolia* mostraron una marcada reducción en su superficie, y se estima una migración hacia la región Mixteca. *Clethra mexicana* disminuyó su distribución en la región Papaloapan y Sierra Norte, pero mostró poco cambio en la región Costa. *Pinus devoniana* mantendrá su representación en todas las regiones del Estado; sin embargo, se observó una reducción en su superficie ([Figura 4](#)).

Escenarios de distribución de las especies para el periodo 2081-2100. En el escenario optimista se estima que todas las especies mostrarán reducción en su distribución ([Figura 5](#); [Tabla 4](#)). Tres especies de *Quercus* (*Q. castanea*, *Q. elliptica* y *Q. rugosa*) mostrarán una reducción en su distribución potencial en más de 80 %. Solo la superficie potencial de *Arbutus xalapensis* será relativamente estable. Siete de las 11 especies (*Arbutus xalapensis*, *Pinus teocote*, *Quercus acutifolia*, *Q. castanea*, *Q. crassifolia*, *Q. magnoliifolia* y *Q. rugosa*) mostrarán una expansión de su distribución hacia la región Mixteca, Valles Centrales, Sierra Sur, Istmo y parte de la Costa.

Ante un escenario pesimista (Figura 6), *Quercus magnoliifolia*, *Q. crassifolia*, *Q. rugosa* y *Pinus teocote* serán las más afectadas, al disminuir la extensión de su hábitat en más de 90 % ([Tabla 4](#)). Bajo este escenario, *Pinus devoniana* reduciría aproximadamente 50 % su superficie; sin embargo, esta especie muestra un desplazamiento en el territorio, lo cual compensa la disminución de su distribución actual. Al igual que en el escenario optimista, *Arbutus xalapensis* mostrará una reducción poco significativa en su superficie de distribución.

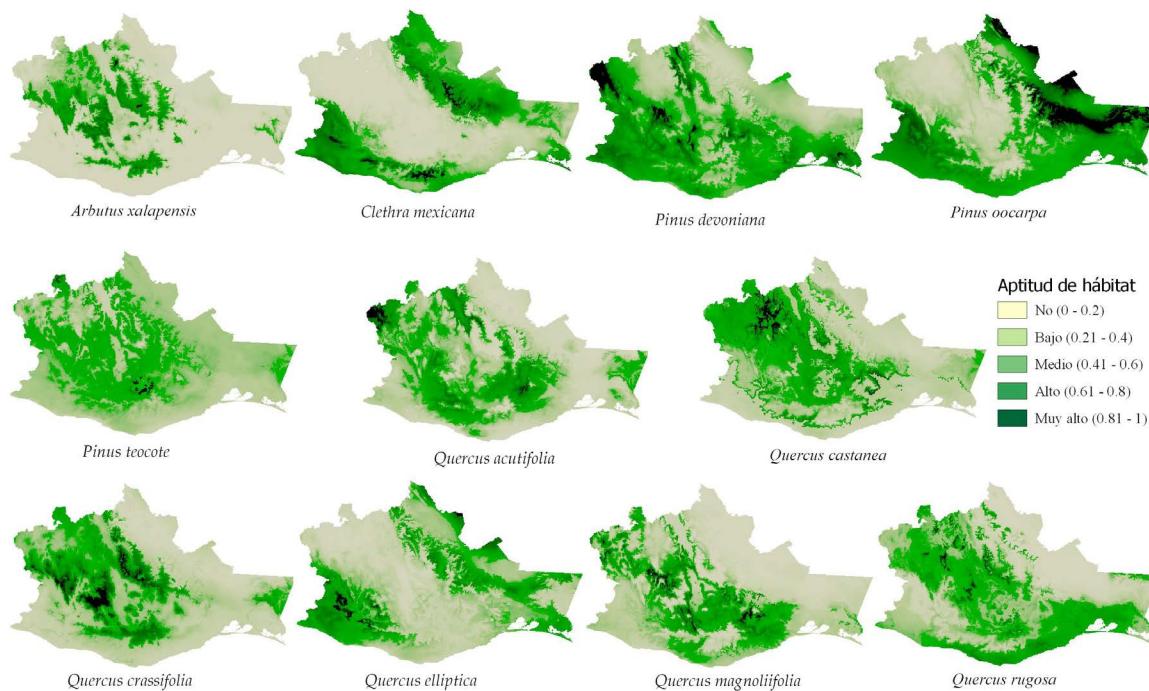


Figura 2. Distribución potencial actual de las especies de bosque templado.

Discusión

Diferentes autores han demostrado la utilidad de los modelos de nicho ecológico para entender el impacto de los cambios en la precipitación y la temperatura sobre la diversidad de especies (Booth *et al.* 2014, Riahi *et al.* 2017). Sin embargo, también se ha reconocido que la influencia de las variables climáticas difiere entre especies y ecosistemas. Los resultados de este estudio muestran que las especies evaluadas son principalmente sensibles a la oscilación de la temperatura y la estacionalidad de la precipitación. Estas condiciones son similares a las reportadas por otros autores para el género *Pinus* (Cruz-Cárdenas *et al.* 2016, García-Aranda *et al.* 2018).

Se observó que el desempeño de los modelos no solo se encuentra relacionado con el número de observaciones, sino con la variabilidad en la distribución de la especie. Por ejemplo, *Pinus devoniana* mostró que, pese al bajo número

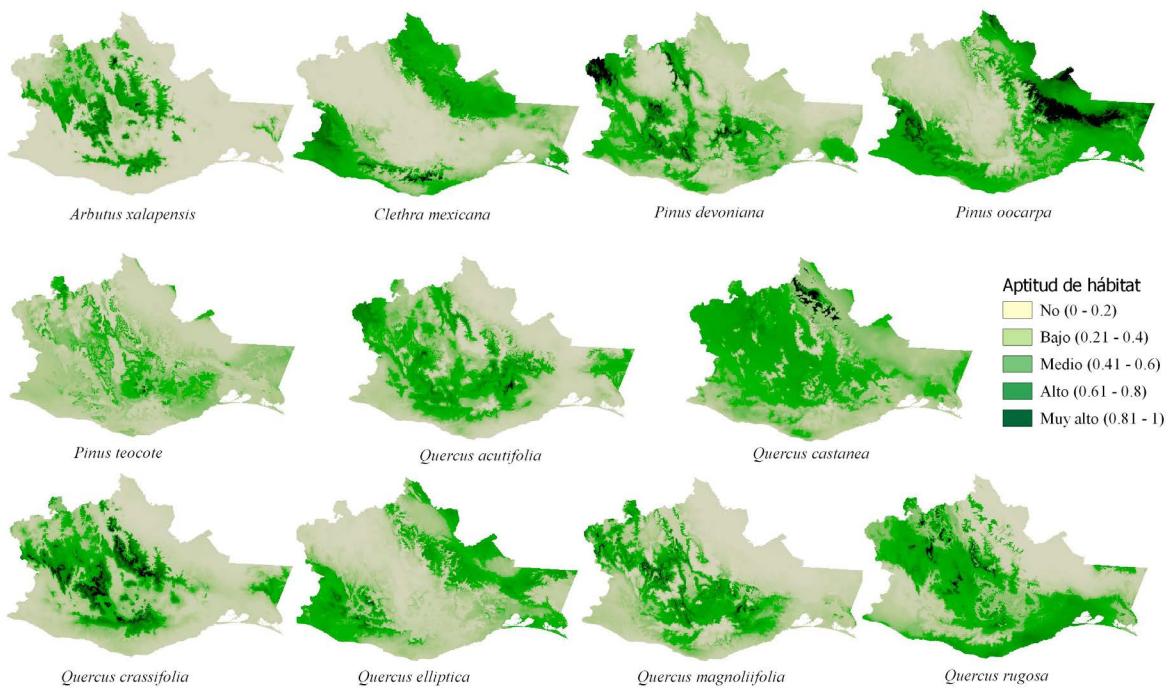


Figura 3. Distribución potencial futura (2030) bajo un escenario optimista (SSP-1 y RCP 2.6) de las especies evaluadas.

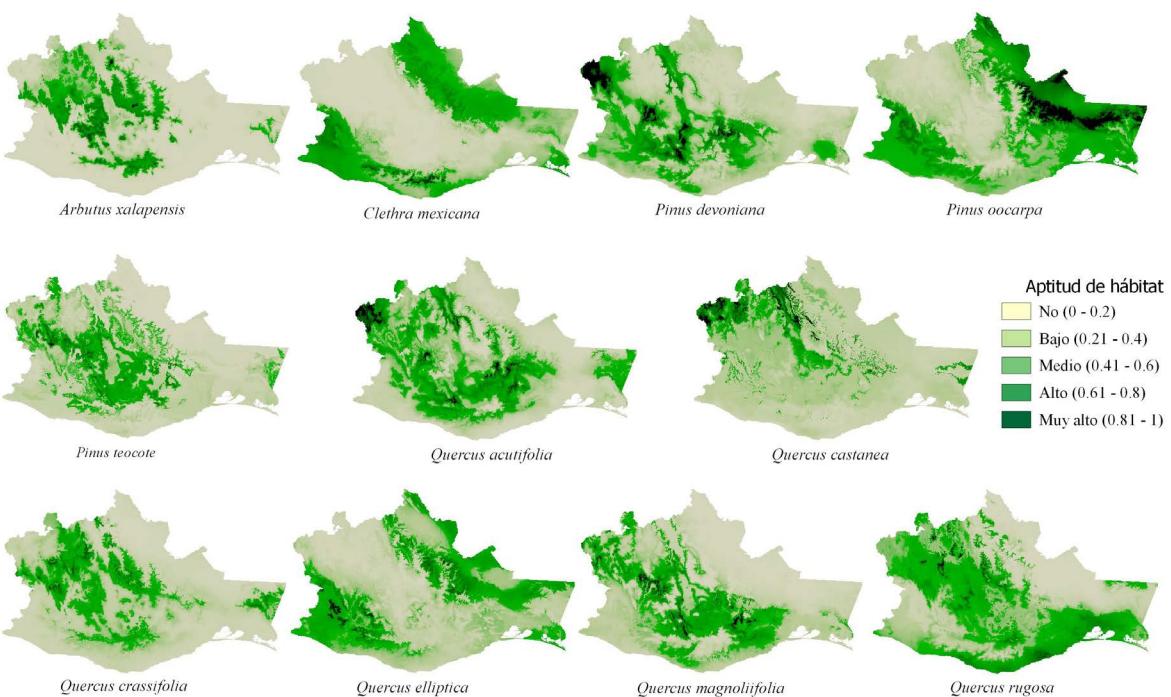


Figura 4. Distribución potencial futura (2030) bajo un escenario pesimista (SSP-5 y RCP 8.5) de las especies evaluadas.

Efecto del cambio climático en especies forestales de Oaxaca

Tabla 5. Superficie potencial (ha) actual y futura ante escenarios de cambio climático para el 2030 y 2090. Los valores entre paréntesis corresponden al porcentaje de cambio en relación con la superficie potencial actual. El signo + indica ganancia y – corresponde a la pérdida porcentual de superficie en relación a la superficie potencial actual.

Especies	Actual	2030		2090	
	Potencial	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
<i>Arbutus xalapensis</i>	1,827,845	1,828,733 (+0.1)	1,823,861 (-0.2)	1,802,297 (-1.4)	1,763,440 (-3.5)
<i>Clethra mexicana</i>	3,942,746	3,500,202 (-11.2)	1,650,481 (-58.1)	3,258,566 (-17.4)	1,506,837 (-61.8)
<i>Pinus devoniana</i>	4,995,774	2,904,657 (-41.9)	2,737,415 (-45.2)	2,881,182 (-42.3)	2,351,086 (-52.9)
<i>Pinus oocarpa</i>	3,427,261	2,340,309 (-31.7)	2,331,427 (-32.0)	2,338,016 (-31.8)	2,331,135 (-32.0)
<i>Pinus teocote</i>	187,665	185,814 (-1.0)	76,511 (-59.2)	82,277 (-56.2)	14,987 (-92.0)
<i>Quercus acutifolia</i>	3,618,914	2,905,119 (-19.7)	2,760,324 (-23.7)	2,770,037 (-23.5)	2,126,629 (-41.2)
<i>Quercus castanea</i>	1,027,277	6,204,063 (+503.9)	45,319 (-95.6)	92,732 (-91.0)	407,456 (-60.3)
<i>Quercus crassifolia</i>	549,168	2,228,249 (+305.8)	185,600 (-66.2)	322,120 (-41.3)	20,683 (-96.2)
<i>Quercus elliptica</i>	2,912,101	2,886,827 (-0.9)	263,863 (-90.9)	511,441 (-82.4)	608,420 (-79.1)
<i>Quercus magnoliifolia</i>	2,815,227	2,504,833 (-11.1)	853,016 (-69.7)	2,374,149 (-15.7)	9,651 (-99.7)
<i>Quercus rugosa</i>	3,464,092	3,400,466 (-1.8)	3,226,232 (-6.9)	412,851 (-88.1)	208,752 (-94.0)

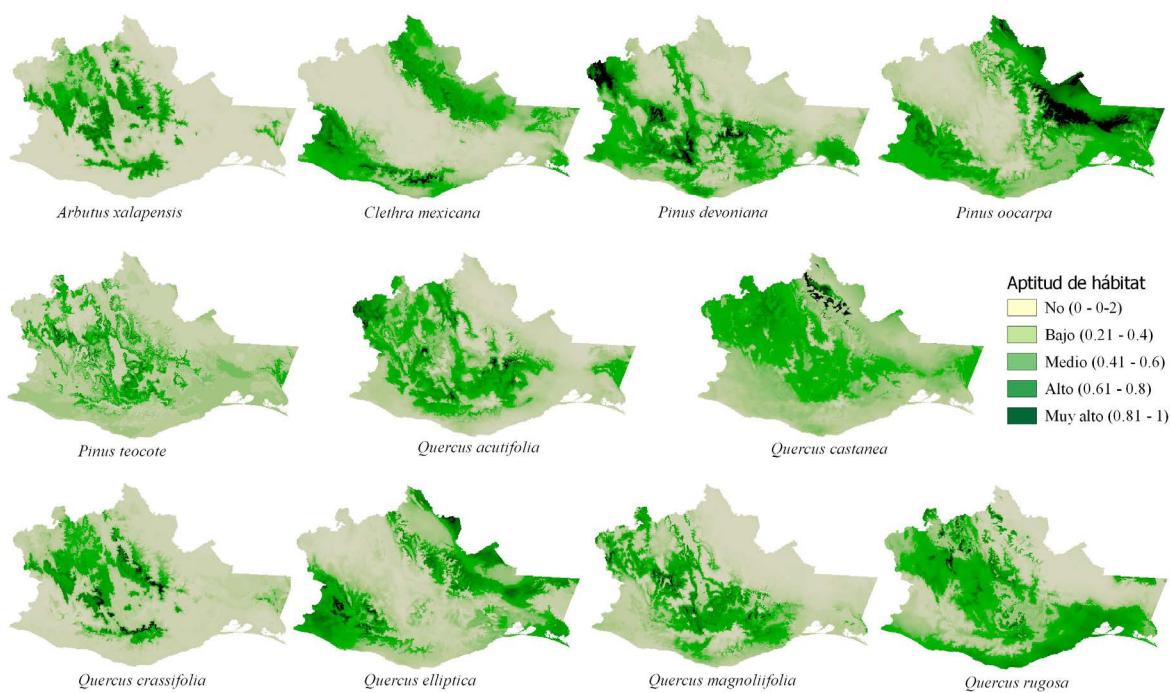


Figura 5. Distribución potencial futura (2090) bajo un escenario optimista (SSP-1 y RCP 2.6) de las especies evaluadas.

de observaciones (57), las características bioclimáticas que restringen su distribución resultaron en un modelo con mayor poder predictivo. Esta condición es importante toda vez que diversos autores han mostrado que el desempeño de los algoritmos requiere un muestreo mínimo de 80 observaciones (Saatchi *et al.* 2011, Corona-Núñez *et al.* 2017), mientras otros autores sugieren que entre 5 y 10 observaciones son suficientes (Pearson *et al.* 2007, Wisz *et al.* 2008).

Por otra parte, los resultados muestran que, ante un escenario de cambio climático optimista, algunas especies de *Pinus* y *Quercus* mostrarán una reducción en su área de distribución potencial, similar a lo reportado por otros autores (Gómez-Guerrero *et al.* 2021). Estas condiciones incrementarán ante un escenario pesimista, en el cual todas las especies muestran reducción de su superficie, así como cambios en sus patrones de distribución espacial. Otros estudios han mostrado que los procesos de migración de las especies de climas templados están dirigidas a porciones del territorio con mayor altitud, siendo estas zonas donde actualmente hay una mayor precipitación y temperaturas más bajas (Safaei *et al.* 2021, Mirhashemi *et al.* 2023). De esta manera, las especies buscan compensar el aumento de la temperatura y reducción de la precipitación (Mendoza-Ponce *et al.* 2020). Estas futuras condiciones climáticas presentarán un reto ambiental en donde los cambios en las composiciones de los ecosistemas templados se verán alterados, lo que puede tener efectos en cascada sobre otras especies de plantas y animales, promoviendo la reducción de los servicios ambientales y la pérdida de biodiversidad (Corona-Núñez *et al.* 2023).

De acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés), de las 11 especies analizadas, solo *Quercus acutifolia* está actualmente catalogada como vulnerable, mientras que las demás se encuentran clasificadas en la categoría de preocupación menor (www.iucnredlist.org). Sin embargo, los resultados de este estudio muestran que, ante escenarios de cambio climático, se espera un cambio en la distribución y reducción de la superficie que ocupan, con lo cual algunas especies podría cambiar su categoría en la clasificación de la IUCN. A su vez, estas condiciones pueden incrementarse debido a procesos de cambio de uso o pérdida de cobertura del suelo (Mendoza-Ponce *et al.* 2021) e incendios forestales (Corona-Núñez *et al.* 2023). Lo anterior pone de manifiesto que estas especies, así como los ecosistemas templados, estarán sujetas a presiones que pueden aumentar su vulnerabilidad y resultar en la extinción local de especies, observación similar a la de autores como Cassini (2011). Finalmente, este estudio muestra que las 11 especies forestales de bosque templado evaluadas estarán en riesgo aún ante escenarios optimistas. Por lo tanto, es indispensable que se establezcan estrategias de manejo para mitigar los impactos del cambio climático (Dawson *et al.* 2011). En particular se considera necesaria la reducción de las presiones antropogénicas y los incendios forestales, así como la implementación de programas de migración asistida (Gómez-Ruiz & Lindig-Cisneros 2017).

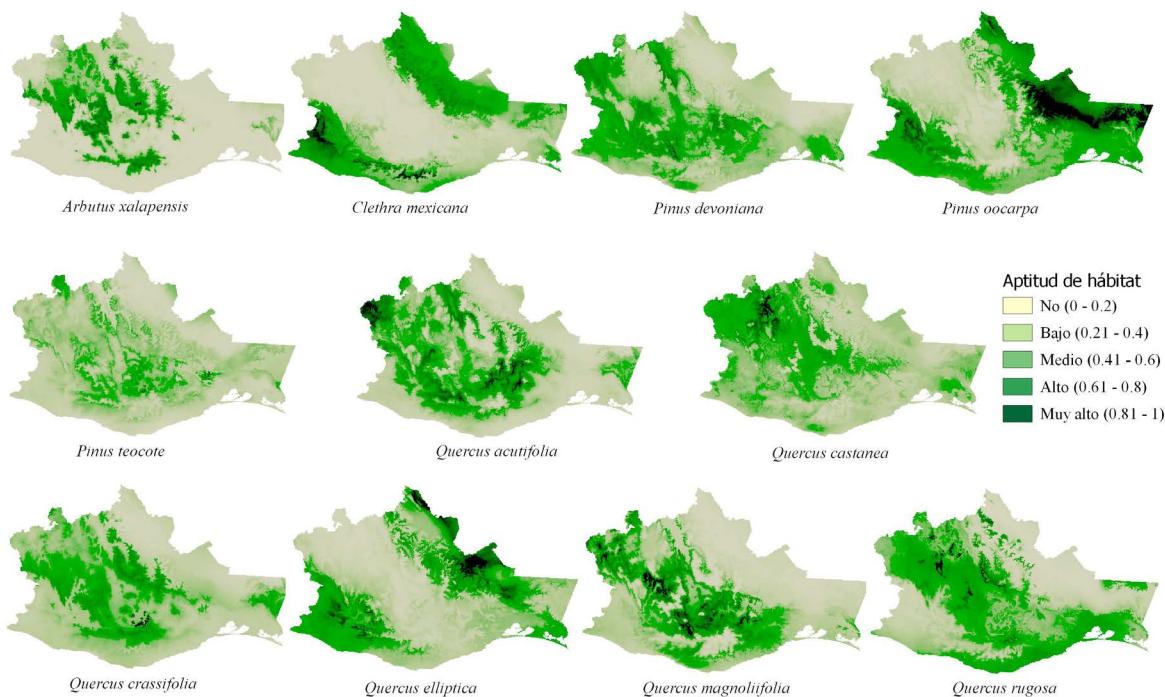


Figura 6. Distribución potencial futura (2090) bajo un escenario pesimista (SSP-5 y RCP 8.5) de las especies evaluadas.

Existe evidencia que las especies forestales de bosques templados serán afectadas por el cambio climático. Esta investigación destaca que las especies evaluadas, en su mayoría del género *Pinus*, presentan una alta sensibilidad a las fluctuaciones térmicas y a los patrones de precipitación. Ambos escenarios muestran que el cambio climático promoverá una reducción en la distribución potencial de especies de *Pinus* y *Quercus*, intensificándose en el escenario pesimista. A medida que las especies buscan refugio en zonas de mayor altitud con condiciones climáticas más adecuadas para su desarrollo, se anticipa un remodelamiento significativo de los ecosistemas templados. Esta transformación ambiental plantea desafíos para la conservación y la biodiversidad, generando la necesidad de implementar estrategias de manejo que reduzcan las presiones actuales sobre los ecosistemas forestales del Estado. En ese contexto, este estudio resalta los riesgos inminentes para las especies de bosques templados en un escenario de cambio climático, reforzando la urgencia de implementar acciones de adaptación y conservación para preservar la integridad de estos ecosistemas y las especies que dependen de ellos.

Agradecimientos

A las autoridades agrarias de la comunidad de San Juan Quiahije, Juquila, así como al Ing. Gregorio Morales y Biól. María del Sol, por su apoyo en el levantamiento de los datos de campo.

Literatura citada

- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* **43**: 1223-1232. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>
- Altamirano del Carmen MA, Estrada F, Gay-García C. 2021. A new method for assessing the performance of general circulation models based on their ability to simulate the response to observed forcing. *Journal of Climate* **34**: 5385-5402. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0510.1>
- Álvarez LR. 1994. *Geografía general del estado de Oaxaca*. 2a. ed., Oaxaca: Carteles Editores, pp. 14-26. ISBN: 9709128604, 9789709128604.
- Anderegg WR, Kane JM, Anderegg LD. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change* **3**: 30-36. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1635>
- Barbet-Massin M, Jiguet F, Albert CH, Thuiller W. 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many? *Methods in Ecology and Evolution* **3**: 327-338. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00172.x>
- Booth TH, Nix H A, Busby JR, Hutchinson MF. 2014. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *Diversity and Distributions* **20**: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>
- Busby JR. 1991. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly* **6**: 8-9.
- Cassini MH. 2011. Ranking threats using species distribution models in the IUCN Red List assessment process. *Biodiversity and Conservation* **20**: 3689-3692. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0126-9>
- CEF [Comisión Estatal Forestal]. 2023. Superficie Forestal Estatal. <https://www.oaxaca.gob.mx/coesfo/superficie-forestal-estatal/> (accessed August 06, 2022).
- CONAFOR [Comisión Nacional Forestal]. 2022. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. <https://snmf.cnf.gob.mx/datos-del-inventario/> (accessed December 05, 2022).
- Corona-Núñez RO, Campo JE. 2023. Climate and socioeconomic drivers of biomass burning and carbon emissions from fires in tropical dry forests: A Pantropical analysis. *Global Change Biology* **29**: 1062-1079. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16516>
- Corona-Núñez RO, Li F, Campo JE, 2020. Fires represent an important source of carbon emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles* **34**: e2020GB006815. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>

Corona-Núñez RO, Mendoza-Ponce A, López-Martínez R. 2017. Model selection changes the spatial heterogeneity and total potential carbon in a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* **405**: 69-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.018>

Corona-Núñez RO, Mendoza-Ponce AV, Campo J. 2021. Assessment of above-ground biomass and carbon loss from a tropical dry forest in Mexico. *Journal of Environmental Management* **282**: 111973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111973>

CONABIO [Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad]. 2022. La biodiversidad en Oaxaca. Estudio de Estado. México. https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios/ee_oaxaca (accessed May 18, 2023).

Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva JT, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval JA. 2016. Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, **22**: 135-148.

Dawson TP, Jackson ST, House JI, Prentice IC, Mace GM. 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, **332**: 53-58. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1200303>

Del Castillo RF, Pérez-De la Rosa JA, Vargas-Amado G, Rivera-García R. 2004. Coníferas. In: García-Mendoza A, Ordoñez MJ, Briones-Salas M, eds. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología UNAM Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza World Wildlife Fundation, México, pp. 141-158. <https://web.ciiroaxaca.ipn.mx/fsanchez/sites/web.ciiroaxaca.ipn.mx.fsanchez/files/pdf/coniferas.pdf>

Fick SE, Hijmans RJ. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, **37**: 4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Freeman BG, Lee-Yaw JA, Sunday JM, Hargreaves AL. 2018. Expanding, shifting and shrinking: The impact of global warming on species' elevational distributions. *Global Ecology and Biogeography*, **27**: 1268-1276. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12774>

García-Aranda MA, Méndez-González J, Hernández-Arizmendi JY. 2018. Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, **5**: 3-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.19136/era.a5n13.1396>

GBIF [Global Biodiversity Information Facility]. 2023. Bases de datos geográficos disponibles para las 11 especies en estudio. <https://www.gbif.org/what-is-gbif> (accessed December 09, 2022).

Gernandt DS, Pérez-De la Rosa JA. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **85**: 126-133. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>

Gómez-Guerrero A, Correa-Díaz A, Castruita-Esparza LU. 2021. Cambio climático y dinámica de los ecosistemas forestales. *Revista Fitotecnia Mexicana* **44**: 673-673. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.673>

Gómez-Ruiz PA, Lindig-Cisneros R. 2017. La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático. *Revista de Ciencias Ambientales*, **51**: 31-51. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.2>

Guisan A, Zimmermann NE. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, **135**: 147-186. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)

Gutiérrez E, Trejo I. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **85**: 179-188. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>

INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía Información geográfica]. 2023. División por entidad federativa con base en el marco geoestadístico. <https://www.inegi.gob.mx/geo/informaciongeografica/oaxaca> (accessed February 12, 2023).

IPCC [Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático]. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (accessed April 25, 2023).

- Jiménez-García D, Peterson AT. 2019. Climate change impact on endangered cloud forest tree species in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad* **90**: e902781. DOI: <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2781>
- Lenoir J, Gégout JC, Marquet PA, de Ruffray P, Brisse H. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* **320**: 1768-1771. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1156831>
- Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón OA, Yerena-Yamallel JI, Manzanilla-Quiñones U. 2020. Current and future potential distribution and identification of suitable areas for the conservation of *Cedrela odorata* L. in the Yucatan Peninsula. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **26**: 391-408. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.10.075>
- Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez RO, Galicia L, Kraxner F. 2019. Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio* **48**: 336-349. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1085-0>
- Mendoza-Ponce AV, Corona-Núñez RO, Kraxner F, Estrada F. 2020. Spatial prioritization for biodiversity conservation in a megadiverse country. *Anthropocene* **32**: 100267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100267>
- Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez RO, Kraxner F, Leduc S, Patrizio P. 2018. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change* **53**: 12-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>
- Mendoza-Ponce A, Corona-Núñez RO, Nava LF, Estrada F, Calderón-Bustamante O, Martínez-Meyer E, Carabias J, Larralde-Corona AH, Barrios M, Pardo-Villegas PD. 2021. Impacts of land management and climate change in a developing and socioenvironmental challenging transboundary region. *Journal of Environmental Management* **300**: 113748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113748>
- Mirhashemi H, Heydari M, Karami O, Ahmadi K, Mosavi A. 2023. Modeling climate change effects on the distribution of oak forests with machine learning. *Forests* **14**: 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030469>
- Nieves VA. 2020. Modelado de distribución de especies en los bosques de los andes meridionales. *Papeles de Geografía* **66**: 195-207. DOI: <https://doi.org/10.6018/geografia.409051>
- Pearson RG, Raxworthy CJ, 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**: 102-117. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Phillips SJ, Dudík M, Schapire RE. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning - ICML '04*, 83. DOI: <https://doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- R Core Team. 2022. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. Versión 4.2.2. www.r-project.org
- Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori SM. 2017. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* **42**: 153-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rivera ER, Amador JA. 2008. Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte I: Evaluación de los modelos de circulación general CCM3. 6 y ECHAM4. 5. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* **15**: 131-173.
- Romero C, Lindig-Cisneros RA, Joyce DG, Beaulieu J, Bradley J St C, Jaquish BC. 2016. Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **22**: 303-323.
- Saatchi SS, Harris NL, Brown S, Lefsky M, Mitchard ETA, Salas W, Zutta BR, Buermann W, Lewis SL, Hagen S, Petrova S, White L, Silman M, Morel A. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**: 9899-9904. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Crookston GE, Pierre, NL, St-Amant D, Beaulieu J, Richardson, B. 2010. Contemporary and projected spline climate surfaces for Mexico and their use in understanding climate-plant relationships. *Climatic Change* **102**: 595-623. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>

Safaei M, Rezayan H, Firouzabadi PZ, Sadidi J. 2021. Optimization of species distribution models using a genetic algorithm for simulating climate change effects on Zagros forests in Iran. *Ecological Informatics* **63**: 101288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101288>

Stockwell D. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* **13**: 143-158. DOI: <https://doi.org/10.1080/136588199241391>

Wisz MS, Hijmans RJ, Li J, Peterson AT, Graham CH, Guisan A, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* **14**: 763-773. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x>

Xu Y, Huang Y, Zhao H, Yang M, Zhuang Y, Ye X. 2021. Modelling the effects of climate change on the distribution of endangered *Cypripedium japonicum* in China. *Forests* **12**: 429. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12040429>

Editor de sección: Pablo Cuevas Reyes

Contribuciones de los autores: JCGS realizó la compilación, organización y análisis de los datos, así como la elaboración de la primera versión y revisión final del manuscrito. HMDLSP, GAP, BVL, MGC, GRO y ROCN revisaron el manuscrito en todas sus fases.

Entidades Financiadoras: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), a través del otorgamiento de la beca para la realización de estudios de posdoctorado en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo.

Los autores declaramos que no existe ningún conflicto de intereses financieros, personales ni en cuanto a la presentación de la información y resultados de este artículo.