



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

IMPACTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO SOBRE ESPECIES
AMENAZADAS DE ENCINO (QUERCUS:
FAGACEAE) EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

FLOR DANIELA NAVARRETE LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. HERNANDO RODRÍGUEZ CORREA

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO

SEPTIEMBRE, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 11** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **13 de enero del 2020**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Flor Daniela Navarrete López** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **41404045**, con el trabajo titulado: **"Impacto del cambio climático sobre especies amenazadas de encino (*Quercus: Fagaceae*) en México"**, bajo la dirección como **tutor** del Dr. Hernando Rodríguez Correa y como **co-tutor** la M. en C. Maribel Arenas Navarro.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dra. Susana Valencia Ávalos
Vocal: Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco
Secretario: Dr. Hernando Rodríguez Correa
Suplente: Dr. Iván Franch Pardo
Suplente: M. en C. Ricardo Legaría Gaitán

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 18 de mayo de 2021.

DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Agradecimientos Institucionales

A la Licenciatura en Ciencias Ambientales impartida en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Dr. Hernando Rodríguez Correa, por darme la oportunidad y guiarme durante todo este proyecto.

A la M. en C. Maribel Arenas por aceptar ser mi co-tutora, por todos sus consejos y por sus grandes aportes a este trabajo.

A la Dra. Susana Valencia Ávalos por su invaluable apoyo y asesoría durante la revisión de la información relacionada con la distribución, taxonomía e historia natural para las especies estudiadas.

A mis sinodales, Dra. Susana Valencia Ávalos, Dr. José Fuentes Junco, Dr. Ivan Franch Pardo y M. en C. Ricardo Gaytan Legaria, por aceptar ser miembros del Jurado, gracias por haber dedicado el tiempo y esfuerzo en la revisión de mi tesis, por todos sus comentarios, ideas y sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México, proyectos IA208017 e IA206319.

A la Rufford Foundation (Reino Unido) a través de los proyectos 25645-1 y 29520-2.

Al Morton Arboretum y la Franklinia Foundation (EUA) a través del proyecto Exploración, restoration and management of *Quercus insignis* within tropical montane cloud forests.

Agradecimientos personales

A Nando, por adoptarme en el laboratorio, muchas gracias por toda la paciencia, por los regaños, por todas y cada una de tus enseñanzas, por creer en mí. Gracias Nando, porque creaste un equipo de laboratorio precioso, porque siempre estuviste dispuesto a apoyarnos y resolver nuestras dudas (que eran muchas), y porque no solo fuiste un asesor sino un amigo. Las palabras no me alcanzan para agradecerte por tu paciencia y dedicación, por aguantarme y apoyarme tanto, gracias por ayudarme a crear este gran proyecto de la mano. ¡GRACIAS!

A Maribel, por ser tan linda y siempre tan paciente para explicarme todas mis dudas, porque sin tu apoyo este proyecto no hubiese llegado a término, gracias por tu tiempo y tus enseñanzas.

A mis compañeras de laboratorio, Meli, Sofi, Athzi, Clau y Tony, porque sin ustedes este proceso hubiese sido amargo, gracias por crear un ambiente tan padre para apoyarnos, tanto de forma académica como personal, gracias por compartir tantos momentos gratos conmigo; les deseo un futuro lleno de éxitos.

A Carmen, David, Anaid, Memo, Enrique, Cesar, Cyndi, Pris y Poncho, gracias por ponerle diversión a todo este proceso, gracias por su apoyo y por sus porras. Gracias por estar.

A Leo, por ser parte fundamental en encontrar mi paz mental durante este proceso, por estar ahí aun cuando parece que no.

A mi Solecito, porque caminamos de la mano en este proceso y sufrimos, y lloramos, y nos desvelamos y nos quejamos juntas todo el tiempo, pero siempre nos apoyamos y sonreímos, sin ti probablemente me hubiese vuelto loca (más loca).

A mi Amorchí, por ser el único médico dispuesto a leer mi tesis. Gracias por acompañarme en esta etapa y prácticamente en este proceso llamado vida, porque aún que tú no me ayudaste a hacer mi tesis, me ayudaste a estar completa para hacerla, sin tus consejos, tu apoyo, tus porras y tu compañía, no sería quien soy hoy (si ya leíste esto, de verdad no tienes por qué leer toda la tesis, no importa jajaja te amo).

A Tita, por ser mi apoyo en esta vida, por siempre escucharme, consolarme y regañarme, por aguantarme y seguir a mi lado. Gracias, básicamente por existir.

Gracias a mi familia:

A mi hermana, por ser una luz un tanto estresante en mi vida pero que siempre brilla para mí, por creerme tan inteligente, por creer en mí. Gracias por apoyarme siempre, simplemente gracias por estar.

A mi hermano, por ser un ejemplo de vida, por inspirarme a llegar a ser tan exitosa como tú, por ser un apoyo en mi vida. Gracias por ser el mejor hermano mayor.

A mi papá, por dedicar su vida a darnos lo mejor, por trabajar tanto y a veces recibir tan poco, gracias por amarme aún que sea a tu manera, gracias por reparar todo lo que se rompía. Te amo infinitamente.

A mi señora madre, por vivir para nosotros, por lograr tus sueños a través de nuestra felicidad, por darnos más de lo que tenías a la mano, gracias por todo tu esfuerzo, por las madrugadas sin dormir, por soportar berrinches, por levantarme cada vez que caí, por curar mis heridas, por enseñarme tanto, por amarme tanto. Te agradezco infinitamente que hayas criado a una mujer de la que vale la pena sentir orgullo, gracias por ser la mejor madre.

Gracias a la persona más importante en mi vida y por la que sigo de pie todos los días, este logro es por y para ti, mamá. Te amo infinitamente.

Índice

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1. El género <i>Quercus</i> (Fagaceae).....	3
1.2. Patrones de diversidad y distribución del género <i>Quercus</i>	3
1.3. Ecología, uso sostenible y conservación del género <i>Quercus</i>	5
1.4. Implicaciones del cambio climático global	7
2. Objetivos	9
2.1. Objetivo general	9
2.2. Objetivos específicos.....	9
3. Hipótesis	9
3.1. Predicciones.....	9
4. Marco Teórico Conceptual	10
4.1. Biología de la conservación.....	10
4.2. Estrategias de conservación.....	11
4.2.1. Estrategias de conservación <i>in situ</i>	11
4.2.2. Estrategias de conservación <i>ex situ</i>	12
4.3. La biogeografía de la conservación	12
4.4. Teoría del nicho ecológico y modelado de nicho ecológico	13
4.5. Cambio climático global.....	15
4.6. Conservación biológica, cambio climático y legislación ambiental.....	16
4.7. Conservación de los encinos en América y México.....	17
4.8. Limitaciones para la conservación de encinos en México	20
5. Materiales y Métodos	21
5.1. Área de estudio	21
5.2. Especies de estudio.....	21
5.3. Registro de presencia.....	24
5.4. Modelado de Nicho Ecológico	25
5.4.1. Registros de ocurrencia y variables climáticas	25
5.4.2. Modelado de nicho ecológico	27
5.5. Análisis Geográficos	27
5.5.1. Distribución del nicho ecológico acumulado de las especies	28
5.5.2. Análisis de las estrategias de conservación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>	28

5.6. Evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo cambio climático	29
6. Resultados	30
6.1. Registros de ocurrencia y variables ambientales	30
6.2. Patrones de distribución del nicho ecológico por especie	32
Sección <i>Lobatae</i>	32
6.2.1. <i>Quercus acherdophylla</i>	32
6.2.2. <i>Quercus acutifolia</i>	33
6.2.3. <i>Quercus affinis</i>	33
6.2.4. <i>Quercus calophylla</i>	34
6.2.5. <i>Quercus crispipilis</i>	35
6.2.6. <i>Quercus devia</i>	35
6.2.7. <i>Quercus elliptica</i>	36
6.2.8. <i>Quercus galeanensis</i>	37
6.2.9. <i>Quercus graciliformis</i>	37
6.2.10. <i>Quercus hintoniorum</i>	38
6.2.11. <i>Quercus hirtifolia</i>	38
6.2.12. <i>Quercus nixoniana</i>	39
6.2.13. <i>Quercus paxtalensis</i>	40
6.2.14. <i>Quercus pinnativenulosa</i>	40
6.2.15. <i>Quercus sapotifolia</i>	41
6.2.16. <i>Quercus skinneri</i>	42
6.2.17. <i>Quercus uxoris</i>	42
6.2.18. <i>Quercus xalapensis</i>	43
Sección <i>Quercus</i>	44
6.2.19. <i>Quercus ajoensis</i>	44
6.2.20. <i>Quercus deliquescens</i>	44
6.2.21. <i>Quercus germana</i>	45
6.2.22. <i>Quercus glabrescens</i>	45
6.2.23. <i>Quercus insignis</i>	46
6.2.24. <i>Quercus macdougalli</i>	47
6.2.25. <i>Quercus martinezii</i>	47
6.2.26. <i>Quercus purulhana</i>	48
6.2.27. <i>Quercus segoviensis</i>	48
6.2.28. <i>Quercus subspathulata</i>	49
Sección <i>Protobalanus</i>	50

6.2.29. <i>Quercus cedrosensis</i>	50
6.3. Patrones de distribución para las especies amenazadas de encinos en México.....	51
6.3.1. Presente.....	51
6.3.2. MIROC5 RCP 4.5.....	52
6.3.3. MIROC5 RCP 8.5.....	52
6.3.4. MPI-ESM-LR RCP 4.5.....	53
6.3.5. MPI-ESM-LR RCP 8.5.....	54
6.4. Papel de las estrategias de conservación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> en la conservación de las especies amenazadas de encinos en México.....	55
6.4.1. Jardines Botánicos del Altiplano Sur.....	64
6.4.2. Jardines Botánicos de la Costa del Pacífico	64
6.4.3. Jardines Botánicos de la Faja Volcánica Trans Mexicana	65
6.4.4. Jardines Botánicos de la Sierra Madre del Sur	65
6.4.5. Jardines Botánicos de la Sierra Madre Oriental	65
6.5. Evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo cambio climático observados.	66
7. Discusión	69
7.1. Distribución de las especies amenazadas del género <i>Quercus</i> en México	69
7.2. Efectos esperados del cambio climático para las especies amenazadas del género <i>Quercus</i> en México.....	69
7.3. Coincidencia entre evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo Cambio Climático observados	72
7.4. Áreas Naturales Protegidas y Jardines Botánicos.....	72
8. Conclusiones	75
9. Bibliografía	77
10. Anexos	84

Resumen

El conocimiento sobre la diversidad, el endemismo, y el grado de amenaza para la conservación de las especies de encinos en México se han incrementado en la última década, sin embargo, el cambio climático global representa una nueva amenaza para la conservación de las especies. Por lo anterior, con el objetivo de estimar la vulnerabilidad de las especies amenazadas del género *Quercus* (Fagaceae) en México, los posibles cambios en su distribución y su representatividad en estrategias de conservación; en este estudio se analizó el nicho ecológico y las áreas geográficas de distribución de 28 especies amenazadas de encinos, bajo 4 escenarios (MIROC5 RCP 4.5, MIROC5 RCP 8.5, MPI-ESM-LR RCP 4.5, MPI-ESM-LR RCP 8.5) de cambio climático proyectados al año 2080. Para ello, se obtuvieron registros geográficos de ocurrencia para cada especie, se modelaron los nichos ecológicos bajo condiciones climáticas actuales y se proyectó la idoneidad del hábitat a condiciones climáticas futuras. Para el análisis general de la distribución de las condiciones idóneas, se crearon 5 mapas con los datos de distribución acumulada de las 28 especies, así mismo, se identificaron los centros de diversidad de encinos. Con el objetivo de determinar la representatividad de las especies de encino en las estrategias de conservación *in situ* y *ex situ* en Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Jardines Botánicos (JB), se realizó un análisis para identificar los tamaños de las áreas de los nichos que se encuentran dentro de cualquier categoría de ANP, de igual manera con los centros de diversidad; para el caso de los JB se calcularon las distancias de las rutas entre JB y los centros de diversidad de encinos por cada región biogeográfica. Los resultados observados mostraron una pérdida de condiciones ambientales idóneas acumulada para las especies estudiadas que varía entre un 5 y 39%, con excepción de los resultados observados por el modelo MPI-ESM-LR RCP 4.5, mismo que proyecta un aumento de un 11% en la distribución. Además, se encontraron nueve especies (*Quercus acherdophylla*, *Q. cedrosensis*, *Q. crispipilis*, *Q. galeanensis*, *Q. graciliformis*, *Q. devia*, *Q. macdougalli*, *Q. martinezzi*, *Q. nixoniana*) en riesgo de extinción, con una pérdida de su distribución potencial de más del 95% al menos en 3 de los 4 escenarios considerados; cinco de dichas especies (*Quercus devia*, *Q. cedrosensis*, *Q. galeanensis*, *Q. acherdophylla*, *Q. macdougalli*) son microendémicas y en algunos casos están asociadas a un solo ecosistema, como es el bosque mesófilo de montaña. Estos resultados sugieren que las especies microendémicas presentan dos amenazas principales, la primera implícita en su distribución restringida, y la segunda el grado de amenaza por cambios en las condiciones climáticas. Sin embargo, se identificaron 10 especies con altas posibilidades de mantener su distribución actual bajo las condiciones del cambio climático, aumentando su distribución o contando con los porcentajes de pérdida más bajos, dichas especies están asociadas a más de un ecosistema, característica que puede ser clave para su persistencia en el futuro. Por otro lado, se identificó a la falta de programas efectivos para la protección de encinos como el principal problema para su conservación tanto *in situ* como *ex situ*, dado que en la actualidad solamente un 10.8% y 9.6% de la distribución acumulada de las especies de encino estudiados y de la superficie de los centros de diversidad, respectivamente, está siendo protegida dentro de alguna categoría de ANP. Con base en lo mencionado anteriormente, se recomienda que el primer paso para la conservación efectiva de encinos en México sea el reconocimiento de su importancia y vulnerabilidad por parte de las instituciones pertinentes, para lograr la inserción del género *Quercus* en proyectos prioritarios de conservación; dichos proyectos deben estar encaminados a promover la participación de comunidades locales, creando conciencia en sus habitantes acerca de los problemas ambientales e incentivando el desarrollo humano y el mantenimiento de los ecosistemas.

Abstract

Knowledge about diversity, endemism, and the degree of threat to the conservation of oak species in Mexico have increased over the past decade, however, global climate change represents a new threat to species conservation. Therefore, with the objective of estimating the vulnerability of threatened species of the genus *Quercus* (Fagaceae) in Mexico, the possible changes in their distribution and their representativeness in conservation strategies; In this study, the ecological niche and geographic distribution areas of 28 endangered oak species were analyzed under 4 scenarios (MIROC5 RCP 4.5, MIROC5 RCP 8.5, MPI-ESM-LR RCP 4.5, MPI-ESM-LR RCP 8.5) of Climate change projected to the year 2080. For this, geographical records of occurrence were obtained for each species, ecological niches were modeled under current climatic conditions and the suitability of the habitat was projected to future climatic conditions. For the general analysis of the distribution of the suitable conditions, 5 maps were created with the accumulated distribution data of the 28 species, likewise, the centers of oak diversity were identified. In order to determine the representativeness of the oak species in the *in situ* and *ex situ* conservation strategies in Natural Protected Areas (NPA) and Botanical Gardens (BG), an analysis was carried out to identify the sizes of the niches' areas that are within any category of NPA, in the same way with the centers of diversity; in the case of the BG, the distances of the routes between BG and the oak diversity centers for each biogeographic region were calculated. The observed results showed an accumulated loss of suitable environmental conditions for the studied species that varies between 5 and 39%, with the exception of the results observed by the MPI-ESM-LR RCP 4.5 model, which projects an increase of 11% in the distribution. In addition, nine species (*Quercus acherdophylla*, *Q. cedrosensis*, *Q. crispipilis*, *Q. galeanensis*, *Q. graciliformis*, *Q. devia*, *Q. macdougalli*, *Q. martinezzi*, *Q. nixoniana*) were found at risk of extinction, with one loss of its potential distribution of more than 95% at least in 3 of the 4 scenarios considered; five of these species (*Quercus devia*, *Q. cedrosensis*, *Q. galeanensis*, *Q. acherdophylla*, *Q. macdougalli*) are microendemic and in some cases are associated with a single ecosystem, such as the cloud forest. These results suggest that micro-endemic species present two main threats, the first implicit in their restricted distribution, and the second the degree of threat due to changes in climatic conditions. However, 10 species were identified with high possibilities of maintaining their current distribution under the conditions of climate change, increasing their distribution or having the lowest loss percentages, these species are associated with more than one ecosystem, a characteristic that may be key for its persistence in the future. On the other hand, the lack of effective programs for the protection of oaks was identified as the main problem for their conservation both *in situ* and *ex situ*, given that currently only 10.8% and 9.6% of the accumulated distribution of species of oak studied and the surface of the diversity centers, respectively, is being protected within some category of NPA. Based on the aforementioned, it is recommended that the first step for effective conservation of oaks in Mexico be the recognition of their importance and vulnerability by the pertinent institutions, to achieve the insertion of the *Quercus* genus in priority conservation projects; these projects should be aimed at promoting the participation of local communities, creating awareness among their inhabitants about environmental problems and encouraging human development and the maintenance of ecosystems.

1. Introducción

1.1. El género *Quercus* (Fagaceae)

El género *Quercus* pertenece a la familia Fagaceae, originada en los trópicos montanos (Johnson et al, 2009); el cual representa al género con mayor distribución alrededor del mundo y el más importante de América dentro de la familia (Valencia-A, 2004), además de contar con una alta diversidad de especies y dominancia ecológica en una gran variedad de hábitats (Kappelle, 2006). Las especies del género *Quercus* presentan una amplia distribución, desde ambientes templados y semi-húmedos, hasta regiones de clima cálido; formando parte de los bosques tropicales perennifolios, bosques mesófilos de montaña y en zonas semiáridas se encuentran de forma arbustiva en los matorrales xerófilos (Rzedowski, 1978).

Las especies del género *Quercus*, son plantas leñosas de gran importancia tanto ecológica como económica, comúnmente conocidos como encinos o robles. Las propuestas taxonómicas tradicionales sugieren que el género se divide en al menos 4 grupos mayores: los encinos rojos (sección *Lobatae*), los encinos blancos (sección *Quercus*) y los encinos intermedios (sección *Protobalanus*), siendo estos nativos de América; el cuarto grupo (sección *Cerris*) que solo habita en ecosistemas de Asia, Europa y África (Nixon, 2009); estos cuatro grupos reúnen más de 400 especies en todo el mundo. Sin embargo, recientemente de acuerdo con un estudio realizado por Hipp et al. (2018), se han descrito dos clados nuevos, las secciones *Virentes* y *Ponticae*, que se distribuyen únicamente en América para el caso de *Virentes* y en América y Europa oriental para *Ponticae*. Las diferencias entre las secciones descritas están dadas principalmente por el periodo de maduración de sus bellotas y por las características de estas (Johnson et al, 2009, Denk T. et al., 2017).

El género *Quercus* cuenta con una alta complejidad taxonómica, debido a la variación morfológica de sus especies como resultado de la interacción con factores ambientales, su facilidad de hibridación y su compleja historia evolutiva; dicha complejidad ha provocado múltiples confusiones en la delimitación e identificación de las especies del género (Zavala-Chávez, 1998).

1.2. Patrones de diversidad y distribución del género *Quercus*

El género *Quercus* se distribuye a lo largo del hemisferio norte; en determinados ecosistemas forestales de Asia, Europa, África y Norteamérica, donde sus especies juegan un papel dominante, ya sea como árboles o arbustos (Pérez-Ramos, 2014). Aproximadamente el 80% de las especies habitan por debajo de los 35° de latitud norte y únicamente menos del 2% (6 o 7 especies) habitan cerca de los 50° latitud norte (Johnson et al, 2009), en cuanto a la distribución altitudinal, se encuentran desde el nivel del mar hasta los 4000 metros (Pérez-Ramos, 2014). Existen dos regiones con una alta riqueza de especies de encinos, una de ellas es América, la cual alberga más de 200 especies del género *Quercus* (Nixon, 2009), mientras que la segunda es el Este y el Sureste de Asia, incluyendo Malasia, Indonesia y Japón con más de 150 especies; Europa y la región del Mediterráneo albergan 30 especies

aproximadamente. Existen dos grandes centros de diversidad de encinos en el mundo; México con aproximadamente 162 especies, de las cuales la mayoría son endémicas y China con más de 100 especies de encinos (Simeone et al, 2013).

La distribución del género *Quercus* en América, es resultado de una serie de fenómenos ecológicos, climáticos, históricos, orogénicos y paleoclimáticos ocurridos desde su origen (Hipp et al. 2018). Diversos autores han descrito que dichos encinos migraron desde la región Neártica hasta llegar a las montañas de Centroamérica y el noroeste de Sudamérica (Galindo-Castañeda, 2006; Hipp et al. 2018). Actualmente su distribución abarca desde Canadá hasta los Andes colombianos, siendo el sureste de los Estados Unidos de Norteamérica y el sur de México los que presentan los niveles más altos de diversidad del género (Valencia-A, 2004).

En cuanto a la riqueza de especies, se puede apreciar claramente una tendencia de la disminución gradual conforme la latitud decrece desde México hasta los Andes colombianos (Nixon, 2001; Cavender-Bares, 2016). Dicha tendencia puede explicarse considerando su historia biológica y geológica. Además, se han descrito diferentes puntos de recambio de especies que incluye la formación del Istmo de Panamá como zona de transición de especies entre el Neártico y el Neotrópico, la Faja Volcánica Transmexicana, el Istmo de Tehuantepec en México, la Depresión de Nicaragua y las montañas de Costa Rica, las cuales pueden funcionar como una barrera de dispersión de los encinos, lo que puede explicar dicha disminución en la riqueza de las especies (Rodríguez-Correa et al, 2015).

Se estima que América cuenta con más de 200 especies del género *Quercus*, dónde México es el centro de diversidad más grande (162 spp), seguido por EUA (91 spp), Guatemala (25-26 spp), Honduras, Nicaragua, Costa Rica (14 spp), Panamá (12 spp), El Salvador (8-10), Belice (9 spp), Canadá (4 spp), Cuba (1 pp) y Colombia (1 spp) (Nixon, 2001).

Los patrones de distribución por grupo o sección de encinos son muy claros, los encinos rojos (*Lobatae*), encinos blancos (*Quercus*) y la sección *Virentes*, tienen una distribución amplia; desde Canadá hasta los Andes colombianos en el caso de *Lobatae* y todo el hemisferio Norte en cuanto a *Quercus*, en cuanto a la sección *Virentes*, abarca el sureste de Norteamérica, México, las Antillas (Cuba) y Centroamérica; los encinos intermedios (*Protobalanus*) tienen una distribución más reducida en el suroeste de Estados Unidos de América y el noroeste de México, de igual forma, la sección *Ponticae* cuenta con una distribución reducida y se encuentra únicamente en el norte de California y en el sur de Oregon (Johnson et al, 2009; Denk, T. et al, 20017).

México cuenta con una diversidad biológica impresionante, su riqueza de especies lo ubica dentro de los 17 países que reúnen entre el 65 y 70% de la biodiversidad global (Mittermeier et al. 1997). El género *Quercus* junto con el género *Pinus*, constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de las áreas de clima templado y semihúmedo en México y se estima que los encinos cubren aproximadamente un 10% de la superficie del país (Gutiérrez R.P. y Bárcenas R., 2008).

Como ya se mencionó anteriormente, México cuenta con aproximadamente 162 especies de encinos que constituyen entre el 32.2 y 40.2% del total de las especies del género, y el 68.8% de las especies del continente; además, se estima que 109 son endémicas de México (Valencia-A, 2004). Las especies de encinos en México no tienen una distribución uniforme,

es decir, se encuentran distribuidas a través de una amplia gama de ecosistemas, esto se debe principalmente a las características ambientales del país y posiblemente al tiempo y lugar de origen de las especies (Muller, 1942 en Zavala-Chávez, 1998). A lo largo del territorio se pueden encontrar encinos desde el nivel del mar y hasta los 3,500 msnm, sin embargo, el 95% de las especies en México se encuentran entre los 1,200 y 2,800 msnm (Zavala-Chávez, 1998).

La mayor diversidad de especies del género *Quercus* habita en la zona montañosa del sur de México (Nixon, 2006) donde el clima es templado o templado semi-húmedo y con lluvias en la época más cálida del año, que, en conjunto, determinan un hábitat idóneo para el crecimiento y reproducción de encinos (Zavala-Chávez, 1998). Sin embargo, la zona centro y noroeste del país también alberga un número importante de especies de encinos (Rodríguez-Correa et al, 2015). Los estados con mayor diversidad de especies del género *Quercus* son Oaxaca con 48 spp, Nuevo León con 47 spp., Jalisco con 45 spp., Chihuahua con 40 spp. y Veracruz con 38 spp. (Valencia-A, 2004).

De las cinco secciones del género *Quercus* presentes en América, en México habitan: 81 especies de encinos blancos (*Quercus*), 76 especies de encinos rojos (*Lobatae*), 4 especies de encinos intermedios (*Protobalanus*) y 3 especies de la sección *Virentes*; de las cuales *Q. calophylla*, *Q. castanea*, *Q. crassifolia*, *Q. laeta*, *Q. microphylla*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa* cuentan con la distribución más amplia en el país (Valencia-A, 2004). El 51% de las especies de encinos mexicanos se distribuyen más allá del país, de las cuales el 31% son compartidas con Norteamérica y 19% con Centroamérica (Zavala- Chávez, 1998).

1.3. Ecología, uso sostenible y conservación del género *Quercus*

Considerando la importancia de México como uno de los centros de diversidad de encinos más grande del mundo resulta alarmante que ninguna de las especies de encino que se distribuyen en el país se encuentran clasificadas bajo alguna categoría de amenaza en la Norma Oficial Mexicana 059 (SEMARNAT, 2010) de especies en riesgo.

El aprovechamiento de las especies de *Quercus* en México ha sido en su mayoría inadecuado, en algunas regiones son sobreexplotados y desperdiciados hasta el grado de su erradicación (Gutiérrez R.P. y Bárcenas R., 2008). El uso que se le ha dado a este género fuera de la industria forestal va desde el uso medicinal, alimenticio, artesanal, forrajero, uso de taninos y colorantes, además de su valor cultural en ciertas comunidades (Luna et al., 2003). Dichos usos han convertido al género *Quercus* en uno de los grupos taxonómicos más importantes económicamente para todo el hemisferio norte (Valencia-A, 2004), cualidad por la que su manejo sostenible y conservación deberían ser considerados prioritarios (Arizaga et al., 2009).

En México, aunque los encinos no se reportan como especies amenazadas, Oldfield y Eastwood (2007) reportan 23 especies de *Quercus* en México dentro de las primeras categorías de riesgo (una en peligro crítico, ocho en peligro y catorce vulnerables); 35 especies no se encuentran en categorías de amenaza crítica y al menos 17 no presentan datos suficientes para su evaluación. Iniciativas en desarrollo por The Morton Arboretum (Illinois, USA) en conjunto con la International Union for the Conservation of Nature (IUCN), sugieren que al menos el 40% de las especies de encinos en México se encuentran dentro de

las primeras categorías de riesgo más preocupantes (23 en peligro crítico, 25 en peligro y 17 vulnerables) (CITES, 2003; IUCN, 2003). Este panorama representa una amenaza seria para la conservación de la biodiversidad que representan las especies del género *Quercus* y para aquellas especies asociadas a los bosques de encino (Luna-Vega et al. 2006).

La conservación de la diversidad biológica *in situ* en México, ha sido liderada por la implementación de Áreas Naturales Protegidas (ANP); mientras que la conservación *ex situ* ha sido abordada por entidades como los jardines botánicos. De igual forma, el gobierno de México ha reconocido que las ANP constituyen un elemento de gran relevancia en la política de desarrollo nacional, en la política ambiental y en los esfuerzos que realiza México para mantener la representatividad de la gran variedad de ecosistemas con la que cuenta el país, de su diversidad biológica, y para mantener la provisión de bienes y servicios ecosistémicos que generan, además proveer mejores condiciones de vida para los habitantes de estas zonas y de sus zonas de influencia (PND 2013; CONABIO 2016).

En el Plan Nacional de Desarrollo de Áreas Naturales Protegidas propuesto desde el año 2013 (PNANP., 2014) se contempla impulsar acciones que permitan incrementar la superficie del territorio catalogada como ANP, con el objetivo de mantener y conservar la representatividad de ecosistemas, recuperar especies en riesgo y a su vez llevar a cabo actividades productivas que generen empleo y ayuden a reducir la pobreza en las comunidades dentro y en las zonas aledañas a las ANP. En dicho plan se proponen distintas herramientas para lograr el objetivo planteado, entre ellas se encuentran, además de las ANP, el establecimiento de Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) y las Regiones Prioritarias para la Conservación (RPC). En el 2010 se publicó la Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas (ECCAP), implementado por la CONANP, tres años después abarcaba 16 ANP distribuidas en el sureste del país, la Sierra Madre Oriental y la zona montañosa del centro del país; con el fin de funcionar como guía para las acciones en materia de mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo, así como reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas naturales y las comunidades humanas (PNANP., 2014; CONABIO., 2016).

Otro gran esfuerzo por resguardar la biodiversidad mexicana es la Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (ENBioMex) y Plan de Acción 2016-2030, como herramienta para integrar criterios de conservación y uso sustentable de la biodiversidad en los planes de todos los sectores del país, coordinada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (CONABIO 2016). Sin embargo, a pesar de que la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) se ha encargado de ampliar la superficie protegida como ANP, reportando un aumento aproximado de 55 millones de hectáreas desde su creación en el 2000 (PNANP 2014; CONABIO 2016), Torres-Miranda et al. (2011) estiman que en el caso de encinos rojos solo el 41.3% de las especies (31 especies) se encuentran protegidas por la red de Áreas Naturales Protegidas en México y Centroamérica; concluyendo que para proteger las 75 especies de encinos rojos en la región sería necesario expandir 12 ANP y crear 26 nuevas áreas con 512 500 ha. Si bien todas estas estrategias han sido de gran ayuda para mantener y proteger la gran biodiversidad del país, no son suficientes para detener las tendencias de degradación que los ecosistemas han presentado (CONABIO 2016).

Bajo el escenario actual de pérdida de biodiversidad que enfrentan México y el mundo, los esfuerzos de conservación *ex situ* representan una estrategia de conservación de gran importancia, no solo ante la necesidad de albergar y conservar un alto número de especies, sino por su valor educativo y de concientización para la población general, su papel en la formación a nivel medio y superior y en la investigación científica. La conservación *ex situ* tiene como objetivo principal disminuir el riesgo de extinción de especies e incluso ser capaces de restablecer poblaciones en su hábitat natural. En especies vegetales, los jardines botánicos encabezan la lista de este tipo de estrategias de conservación; su labor consta del cultivo y uso sustentable de especies, acompañado de un trabajo intenso de educación ambiental y (en algunas instancias) investigación científica (Lascuráin et al., 2009).

Es importante mencionar que dicha estrategia de conservación también conlleva desventajas claras como la pérdida de variabilidad genética de las poblaciones en cautiverio y la disminución de la capacidad de adaptación al medio silvestre de las mismas (Lascuráin et al., 2009). Para el caso de México las estrategias de conservación *ex situ* han sido lideradas por la Asociación Mexicana de Jardines Botánicos, A.C. Dicha institución reporta 51 jardines miembros alrededor del país albergando cerca del 37% de las especies de plantas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010; si bien no todas las especies albergadas en los jardines botánicos forman parte de algún programa de conservación, todas son importantes para el desarrollo de estudios biológicos y de educación ambiental (Lascuráin et al., 2009).

1.4. Implicaciones del cambio climático global

En los últimos años se han registrado alteraciones climáticas tales como aumentos en la temperatura y el nivel del mar y cambios en los patrones de precipitación; estas alteraciones son causadas en gran medida por el cambio climático global, producto del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014). Las diferentes actividades humanas han intensificado el cambio climático, provocando consecuencias negativas para los sistemas naturales y los humanos; planteando nuevos retos y riesgos como la pérdida de biodiversidad, modificación de los patrones de migración de las especies, el cambio de uso de suelo, la fragmentación y un deterioro general en los ecosistemas (IPCC, 2014). Se estima que los ecosistemas más afectados por el cambio climático en México serán los bosques de coníferas y encinos, seguidos por los matorrales xerófilos, los bosques mesófilos de montaña, los ecosistemas acuáticos y los pastizales, provocando variaciones en la distribución y tamaño de las poblaciones (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007).

Debido a que los encinos se distribuyen en una amplia variedad de ecosistemas, los efectos del cambio climático sobre ellos pueden ser diferentes. Las especies de encino distribuidas en los ecosistemas de climas templados y cálidos pueden ser favorecidas al incrementar su distribución, mientras que las especies que habitan en climas semifríos y/o templados húmedos podrían ver su área de distribución reducida hasta en un 50% (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007). Sin embargo, estas estimaciones cuentan con una gran incertidumbre pues cada especie responderá de acuerdo con su capacidad de adaptación y a la resiliencia de los ecosistemas ante las alteraciones provocadas por el cambio climático (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007).

Aunque el conocimiento sobre la diversidad y el endemismo de las especies de encino, junto al grado de amenaza para su conservación en México se han incrementado en la última década, el cambio climático global representa una nueva amenaza para la conservación de las especies (IPCC, 2014). Por lo anterior, es fundamental considerar sus efectos sobre las especies, determinar la efectividad tanto de las estrategias de conservación *in situ* (las áreas naturales protegidas), como las estrategias de conservación *ex situ* (los jardines botánicos) para la protección de los encinos, y proponer mecanismos de conservación efectiva, que a su vez consideren variables como el cambio climático global. Bajo esta premisa, el presente estudio pretende evaluar los posibles efectos del cambio climático sobre la distribución y el estado de la conservación proyectado al año 2080 para las especies categorizadas como amenazadas del género *Quercus* en México.

2. Objetivos

Considerando el planteamiento teórico y conceptual anterior la presente investigación pretende lograr los siguientes objetivos.

2.1. Objetivo general

Determinar el grado de vulnerabilidad de las especies amenazadas del género *Quercus* (Fagaceae) bajo un contexto de cambio climático y de acuerdo con diferentes modelos de circulación de gases proyectados al año 2080 en México.

2.2. Objetivos específicos

- i. Estimar la riqueza de especies amenazadas del género *Quercus* en estrategias de conservación *in situ* (ANP) y *ex situ* (Jardines Botánicos de México).
- ii. Determinar los posibles cambios en la distribución de las especies amenazadas de encino bajo escenarios de cambio climático para el año 2080.
- iii. Generar las bases teóricas para establecer esquemas donde se maximice la representatividad y conservación de especies amenazadas dentro de las ANP, los JBM y la conectividad entre las mismas.

3. Hipótesis

La vulnerabilidad, entendida como el riesgo de extinción para las especies del género *Quercus* en México, dependerá de la magnitud de los cambios en el comportamiento anual de variables ambientales como la temperatura y la precipitación, esperados bajo diferentes escenarios de cambio climático global y de las estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*.

3.1. Predicciones

- i. Ante el poco reconocimiento de las especies amenazadas del género *Quercus* en México, su representatividad en términos de riqueza de especies para las estrategias de conservación (*in situ* y *ex situ*) será reducida e insuficiente para la preservación efectiva de poblaciones ecológicamente viables.
- ii. Las especies amenazadas del género *Quercus* presentarán un incremento o disminución en su área de distribución dependiendo del clima predominante en el ecosistema; se espera que los encinos distribuidos en ecosistemas de climas templados y cálidos se vean favorecidas, mientras que las especies que habitan en climas semifríos y/o templados húmedos vean su área de distribución reducida.
- iii. La conservación del género *Quercus* requerirá la coordinación efectiva entre ANP y JBM para el reconocimiento y protección de las especies amenazadas, así como la adición de los posibles efectos para dichas especies bajo escenarios de cambio climático en los planes de manejo de las ANP.

4. Marco Teórico Conceptual

4.1. Biología de la conservación

Los efectos en la biodiversidad como consecuencia del cambio climático global y la crisis ambiental contemporánea, favorecieron la aparición de una nueva ciencia denominada Biología de la Conservación, la cual integra elementos del conocimiento en disciplinas como la ecología, la biogeografía, la genética de poblaciones, economía, antropología, entre otras, para atender al reto planteado por la pérdida, fragmentación y modificación de hábitats y su biodiversidad (Sánchez-Rojas, 2009). Desde su conformación, se han propuesto múltiples definiciones, Soulé (1985) define a la Biología de la Conservación como el entendimiento de los efectos directos o indirectos de las actividades humanas y otros agentes en los ecosistemas, y las técnicas para prevenir la extinción de especies.

Por otro lado, Wilson (1992) la define como una nueva ciencia integrativa con 3 metas principales: a) documentar la diversidad natural del planeta; b) investigar el efecto de las actividades humanas sobre las especies, comunidades y ecosistemas; c) desarrollar técnicas que prevengan la extinción. Mientras que Primack (1995) define a la Biología de la Conservación como una ciencia multidisciplinaria con el objetivo de investigar los efectos de las actividades humanas sobre las comunidades biológicas y ecosistemas y para desarrollar aproximaciones prácticas en la prevención de la degradación de los ecosistemas y para el restablecimiento de poblaciones con relaciones sustentables entre las comunidades humanas y los ecosistemas.

Si bien las definiciones difieren en la profundidad o enfoque (p.e. preservacionista o conservacionista), todas concuerdan en que el objetivo principal de la Biología de la Conservación es la protección y la permanencia de comunidades y ecosistemas (Soulé, 1985) en el tiempo y el espacio. La conservación de la naturaleza es considerada de gran importancia, no solo por el valor instrumental y económico que se le da, también por los valores intrínsecos, sus valores emocionales, espirituales y psicológicos (Callicott et al. 1999). Actualmente, la Biología de la Conservación actúa con 3 metas principales: mantener la diversidad biológica existente en los sistemas vivos, conservar la composición, la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (integridad ecológica) e incentivar su resiliencia y capacidad de permanecer en el tiempo (salud ecológica) (Trombulak S.C., 1993). Dichas metas se rigen bajo los siguientes supuestos:

i) La diversidad biológica de un sistema natural está compuesto por toda la variedad de organismos vivos presentes en todos los niveles de organización (desde genes hasta la variedad de hábitat). Dicha diversidad puede ser medida y expresada de múltiples formas, desde números absolutos, abundancias relativas o características ecológicas diferenciales. Las actividades antrópicas no son las únicas capaces de alterar la diversidad biológica, ya que esta es influenciada por procesos ecológicos y evolutivos. En términos generales se entiende que una especie está amenazada cuando cumple con alguno de los siguientes puntos: 1) es rara, es decir, cuenta con alto grado de endemismo y/o se encuentra restringida a un área geográfica determinada o bien a un hábitat extremadamente reducido; 2) sus individuos

están disminuyendo. Todo componente de la diversidad debe ser considerado de valor por su papel en el mantenimiento de la salud ecológica del sistema.

ii) La integridad ecológica se define como la capacidad que tiene un sistema natural para conservar su estructura y funcionamiento a lo largo del tiempo, dicho grado medido en relación con ecosistemas que no han sido alterados por actividades antrópicas. La protección de la integridad ecológica requiere de esfuerzos a través de todos los niveles de la jerarquía biológica que componen al sistema que se busca conservar.

iii) La salud ecológica se mide con base en la productividad, la complejidad, la calidad de sus interacciones bióticas y su resiliencia, todas las anteriores en relación con ecosistemas no alterados (Trombulak S.C., 1993).

4.2. Estrategias de conservación

La conservación y protección de la diversidad biológica son temas que conciernen a toda la humanidad, por lo cual, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) establecido durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo realizada en Río de Janeiro en 1992, declara la importancia del mantenimiento de la diversidad biológica y establece como primordial la conservación *in situ* de la biodiversidad (CBD, 1992), lo cual implica que las especies permanecen dentro de sus hábitats naturales y su variabilidad genética evoluciona con el ambiente (IICA, 2010); en este sentido, la implementación de Áreas Naturales Protegidas (ANP) resulta la principal herramienta y el eje central en todas las estrategias nacionales e internacionales de conservación de la biodiversidad (IUCN, 2013).

4.2.1. Estrategias de conservación *in situ*

Un ANP se define como aquella área geográficamente definida y manejada a través de medios legales por parte de entidades gubernamentales o no gubernamentales, con el objetivo de conservar a largo plazo sus recursos naturales y a su vez mantener los servicios ecosistémicos y sus valores culturales (IUCN, 2012). México como firmante de dicho Convenio ha destinado más de 25 millones de hectáreas para la conservación *in situ* por medio de las ANP, las cuales tienen como objetivo la protección de la diversidad biológica y los ecosistemas con mayor representatividad en el país, además de la búsqueda e implementación de técnicas productivas sostenibles que también permitan la subsistencia de los propietarios y sus habitantes (PNANP, 2014; CONABIO, 2016).

Además de las ANP, en México, la conservación biológica se aborda por medio de las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) y las Regiones Prioritarias para la Conservación (RPC). Las ADVC son espacios de propiedad privada, comunal o ejidal que son certificados de manera voluntaria por sus propietarios para su manejo como ANP, esta categoría permite la participación directa de la sociedad civil en las tareas de conservación y abarca alrededor de 399 mil hectáreas. Las RPC comprenden aquellas áreas que por su alta importancia demandan de su protección y conservación y no cuentan con un decreto Federal, Estatal o Municipal, tal es el caso de los humedales y arrecifes de coral (PNANP, 2014; CONABIO, 2016).

4.2.2. Estrategias de conservación *ex situ*

La conservación *ex situ* se refiere a la conservación de la diversidad biológica fuera de sus ambientes naturales, desde el nivel genético hasta el poblacional. La biodiversidad representada en esta estrategia de conservación es contenida en bancos de germoplasma o colecciones vivas como herbarios y zoológicos (IICA, 2010). Cabe mencionar que el CBD sugiere que las estrategias de conservación *ex situ* sean consideradas principalmente como medidas para complementar la conservación *in situ*, y dentro del mismo convenio, la Estrategia Global para la Conservación Vegetal define como objetivo albergar el 60% de las especies en peligro de extinción en cultivo *ex situ* y el 10% de especies para implementar procesos de restauración o recuperación ecológica (CBD, 1992).

En México, La Asociación Mexicana de Jardines Botánicos, tomando como referencia la legislación vigente que define a las especies nativas o en categorías de riesgo (NOM-59-SEMARNAT-2001), se ha comprometido a tener representadas al menos un 40% de las especies en peligro y un 5% de especies destinadas para establecer o apoyar programas de recuperación ecológica, sin embargo, en la actualidad se ha observado que las estrategias de conservación *ex situ* en México no han tenido un efecto significativo en la conservación de especies y ecosistemas (Lascuráin et al., 2009).

4.3. La biogeografía de la conservación

La biogeografía se define como el estudio de los patrones de distribución de los organismos en el espacio y tiempo (Cox et al., 1976; Crisci et al., 2009), su objetivo principal es determinar cómo el entorno físico, la biología y la historia evolutiva de una especie interactúan para producir su propio patrón de distribución (Cox et al., 1976). La biogeografía como disciplina se ubica en el punto de encuentro de varios campos de estudio (como la ecología, la geografía, la geología, la evolución, la antropología económica, entre otras) puesto que, comprender por qué un grupo particular de organismos habitan en un área específica requiere del conocimiento de todas las relaciones ecológicas y evolutivas del individuo (Cox et al., 1976).

Las formas de vida silvestre no se distribuyen de manera azarosa sobre la superficie del mundo, cada especie ocupa un área limitada, aunque el tamaño puede variar mucho entre cada especie (Cox et al., 1976). Entender la presencia o ausencia de especies en algunas regiones y no en otras, implica un vasto conocimiento de la historia evolutiva de la especie y de la historia geológica de las masas terrestres, ya que los procesos de deriva continental han transportado individuos alrededor de todo el mundo creando nuevos patrones de distribución a través del tiempo (Cox et al., 1976).

La distribución de una especie es definida por una gran variedad de factores, tales como su fisiología, crecimiento y comportamiento; dichos factores se desarrollan dentro de un determinado rango de condiciones ambientales, aunadas a un cierto tipo de recursos alimenticios; dado que dichas condiciones y recursos están lejos de tener una distribución uniforme en el planeta, la distribución de los organismos que dependen de ellos también tiende a ser desigual. (Cox et al., 1976). Por lo tanto, los patrones de distribución de cada especie están fuertemente ligados y relacionados a los patrones de distribución de las condiciones físicas y de los recursos alimenticios a los que cada especie se ha adaptado a

través de su historia evolutiva (Cox et al., 1976). De acuerdo con Crisci et al. (2009) existen tres procesos espacio-temporales que pueden modificar la distribución geográfica de los organismos:

i) La extinción, entendida como la muerte de todos los individuos de una especie en todos los niveles ecológicos.

ii) La dispersión, proceso en el cual algún individuo de una población ancestral que está limitada por una barrera preexistente logra cruzar y colonizar una nueva área, si dichos individuos permanecen aislados de la población original, eventualmente pueden diferenciarse creando un nuevo taxón.

iii) La vicarianza, proceso en el cual una población es dividida por la aparición de una barrera que no pueden cruzar, creando subpoblaciones distintas que pueden eventualmente dar origen a nuevos taxones.

Sin embargo, Cox et al. (1976) aseguran que la barrera más común es la propia fisiología de las especies y no las características o los fenómenos hostiles interpuestos por el medio ambiente; cada especie se ha adaptado a tolerar únicamente un rango limitado de condiciones ambientales, por lo tanto, en cuanto a su distribución cada especie es “prisionera” de su propia historia evolutiva. Actualmente, la influencia de los seres humanos sobre los sistemas naturales va en aumento, creando y destruyendo hábitats constantemente y por consiguiente, provocando cambios rápidos en la distribución de muchas otras especies, razón por la cual los biogeógrafos y conservacionistas se han visto en la necesidad de controlar dichos efectos en la naturaleza (Cox et al., 1976).

La conservación y el manejo de especies requiere de un conocimiento detallado de su biología y su distribución geográfica, para así poder identificar las condiciones del entorno que requieren para su supervivencia; la biogeografía nos permite determinar si una especie puede sobrevivir o ser productiva en entornos donde de forma natural no se encontraría (Cox et al., 1976), herramienta que es de gran importancia para los proyectos de conservación planteados bajo escenarios de cambio climático (Rodríguez-Sánchez, 2011); además de permitir la priorización de áreas con mayor cantidad de endemismos, representatividad de especies y complementariedad en el mínimo de área (Margules y Sarkar, 2009; Escalante, 2015).

Con base en lo mencionado anteriormente, la biogeografía de la conservación se define como la aplicación de los principios y teorías biogeográficas en los procesos de distribución de las especies, en los problemas relacionados con la conservación de la biodiversidad (Whittaker et al., 2005), por lo tanto, la biogeografía es fundamental para el desarrollo de programas de conservación y manejo de sistemas naturales (Cox et al., 1976; Rodríguez-Sánchez, 2011).

4.4. Teoría del nicho ecológico y modelado de nicho ecológico

El nicho ecológico ha sido un tema de desarrollo conceptual y teórico extenso en las ciencias biológicas, mismo que ha sido estudiado en detalle por varios autores entre ellos Hutchinson (1957), quien lo define como un hipervolumen de n-dimensiones, donde dichas dimensiones representan a todos los recursos existentes en el ambiente, las adaptaciones de los organismos y cómo estos se relacionan en el espacio. Para Illoldi y Escalante (2008), el nicho ecológico

abarca a todos los factores bióticos y abióticos con los que un organismo interactúa, en un tiempo y espacio determinado.

En este sentido, Peterson et al. (2011) definen el nicho ecológico como el conjunto de variables que permiten a una especie mantener poblaciones efectivas en un espacio geográfico determinado. Existen dos tipos de variables que componen al nicho: escenopoéticas y bionómicas; las primeras son de carácter ambiental y no son consumidas ni afectadas por las especies, ejemplos de dichas variables son la temperatura, precipitación topografía, etc., mientras que las bionómicas son aquellas que sí son consumidas, son modificadas por las especies y son objeto de competencia, tales como los recursos naturales.

Bajo la teoría de nicho ecológico se han definido diferentes perspectivas para abordarlo, entre ellas podemos encontrar los nichos Grinellianos y los nichos Eltonianos; los primeros también conocidos como nichos ambientales, están compuestos por las variables escenopoéticas que permiten a las especies persistir en un espacio determinado, mientras que los nichos Eltonianos se componen por las variables bionómicas, donde el papel funcional de las especies en el ecosistema, así como sus interacciones bióticas son tomadas en cuenta para identificar el espacio en el que las especies pueden existir (Soberón, 2007; Soberon y Nakamura, 2009; Peterson et al., 2011; Anderson, 2013).

Peterson et al. (2011) explican mediante el “Diagrama de BAM” (Fig. 1) la dinámica del nicho ecológico de una especie, donde (A) representa a las características abióticas (o scenopoéticas), (B) son las interacciones bióticas (o bionómicas) y (M) el área geográfica accesible. Estos tres aspectos permiten definir dos importantes regiones: el área de distribución ocupada ($G_o = A \cap B \cap M$) y el área de distribución invadible ($G_i = A \cap B \cap M^c$). G_o es el área accesible donde las condiciones ambientales y bióticas permiten que la especie mantenga poblaciones viables, mientras que G_i es el área que la especie podría ocupar si las restricciones actuales en su distribución fueran superadas; M^c representa a todas aquellas áreas donde la especie actualmente es incapaz de migrar. Finalmente, la unión del área ocupada y el área invadible ($G_p = G_o \cup G_i$), podría ser definida como “el área de distribución potencial” de la especie.

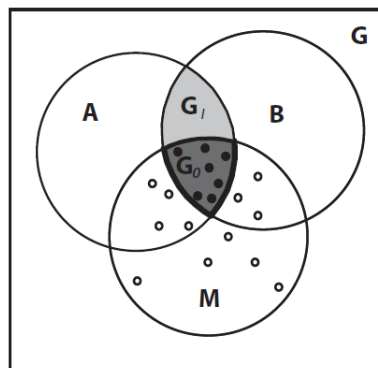


Fig. 1. Diagrama BAM que explica la interacción entre las condiciones abióticas (A), las interacciones bióticas (B) y la movilidad de la especie (M). Tomado de Peterson et al. (2011).

Posteriormente, atendiendo a la necesidad de estimar la distribución de las especies en el espacio y tiempo, se han desarrollado herramientas tales como el Modelado de Nicho Ecológico (MNE), dichos modelos son representaciones cartográficas de la idoneidad ambiental en el espacio, muestran la probabilidad de presencia de una especie en función de las variables utilizadas para generar dicha representación (Mateo et al., 2011; Peterson et al., 2011). Así pues, el objetivo final del MNE es determinar sitios idóneos para la persistencia de las poblaciones de una especie a través de la identificación de sus requerimientos ambientales (Soberón y Nakamura, 2009).

La generación de modelos de nicho ecológico requiere principalmente contar con datos de observación de ocurrencia de la especie y con las variables ambientales que se estima pueden influir en la persistencia de la especie y por lo tanto en la distribución de esta, ya sea como un factor limitante o como indicador a través de relaciones indirectas, todo esto sobre un espacio geográfico definido (Peterson et al., 2011; Anderson, 2015). Las variables ambientales que comúnmente se emplean en el MNE son aquellas relacionadas con el clima, la edafología, geología, de elevación, hidrología, demografía, entre otras (Peterson et al., 2011).

Existen múltiples algoritmos de modelación, los cuales emplean funciones matemáticas para estimar el nicho ecológico de la especie; el algoritmo es una parte importante del amplio proceso que conlleva el MNE, en conjunto con otros factores como la selección de variables ambientales, los datos de ocurrencia, la selección del área accesible (M) y la calibración del modelo, entre otros (Peterson et al., 2011).

Dentro de los diferentes programas de modelación, uno de los más utilizados es Maximum Entropy Species Distribution Modeling (MaxEnt), este programa se basa en el principio de máxima entropía, y requiere de una base de datos con un mínimo de hasta 5 registros espaciales de presencia asociadas a un conjunto de variables ambientales. El modelo de nicho ecológico se genera mediante la estimación de la distribución de probabilidad de máxima entropía (cercana a la uniforme) definido por un conjunto de reglas probabilísticas que representan la información parcial acerca de la distribución de una especie, de tal manera que el resultado es un mapa de celdas en el espacio geográfico en donde cada celda tiene una probabilidad de contar con las condiciones ambientales favorables para la especie en cuestión (Phillips et al., 2006; Baldwin, 2009).

4.5.Cambio climático global

El cambio climático global representa el mayor riesgo para la biodiversidad en este siglo; como consecuencia de las actividades humanas tales como la deforestación y la quema de recursos fósiles, entre muchas otras. La composición química de la atmósfera se ha alterado drásticamente en las últimas décadas, provocando cambios en el clima, la precipitación y en la probabilidad de que ocurran fenómenos naturales, afectando ecosistemas y su biodiversidad (Corradi, 2016; IPCC, 2014). El clima en nuestro planeta está determinado por factores internos y externos en constante interacción, entre ellos el ciclo hidrológico, el ciclo del carbono, la radiación solar y las actividades humanas (Corradi, 2016). Uno de los factores más preocupantes del cambio climático global es el efecto invernadero, provocado por la acumulación de gases en la atmósfera que impiden la salida de la radiación solar al espacio

exterior, provocando la elevación de la temperatura en la superficie del planeta (IPCC, 2013).

Actualmente, el compuesto más común en las emisiones de actividades humanas es el dióxido de carbono (CO₂), compuesto que se mantiene en la atmósfera por más de 100 años, resultando en una acumulación imposible de sobrellevar por las condiciones atmosféricas naturales, por lo cual es el principal gas de efecto invernadero (GEI); otros gases dañinos son el metano (CH₄), los óxidos nitrosos (N₂O), los clorofluorocarbonos (CFC) y el ozono (O₃) (Houghton et al., 1990; Sato et al., 1989; Dixon et al., 1994). De acuerdo con el Panel Internacional sobre Cambio Climático (IPCC, 2019) la temperatura de la tierra ya ha aumentado alrededor de 0.8°C y 1.2°C aproximadamente, en el último siglo y se estima un aumento mayor para el futuro.

Ante los efectos del cambio climático global, los ecosistemas naturales se enfrentarán a condiciones ambientales nuevas para las cuales no están adaptados; en el caso de los ecosistemas boscosos, las especies estarán expuestas a cambios en la temperatura media y temperaturas extremas, la disponibilidad de agua y precipitaciones, a la acidificación del suelo y la pérdida de nutrientes (IPCC, 2013). Por lo tanto, las estrategias de conservación deben abordar las posibilidades resultantes del cambio climático global, mismas que han sido descritas a partir de modelos climáticos que pretenden predecir las condiciones ambientales futuras.

Las trayectorias de concentración representativas (RCP) son modelos climáticos que muestran los posibles escenarios futuros con base en las concentraciones de las emisiones antropogénicas para el 2100 con respecto a las del año 1740; existen 4 escenarios de RCP (RCP 2.6; RCP 4.5; RCP 6.0; RCP 8.5) donde el RCP2,6 es un escenario que considera la implementación de estrategias efectivas de mitigación, resultando el más optimista. El RCP 4.5 y RCP 6.0 representan los escenarios intermedios, lo que significa que las emisiones para dichos escenarios tendrán aumentos mínimos o se mantendrán estables. Finalmente, el escenario RCP 8.5 es el más pesimista, contemplando un gran aumento en las emisiones de GEI (BID, 2015)

Con base en las trayectorias de concentración representativas, se estima que para finales del siglo XXI la temperatura global se incrementará entre 1.5°C (con los escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0) y 4°C (con el RCP 8.5), provocando temperaturas extremas calientes con más frecuencia que las frías y desencadenando con ellas una serie de alteraciones a través de toda la superficie terrestre (IPCC, 2013).

4.6. Conservación biológica, cambio climático y legislación ambiental

A partir del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) y la adopción del Plan Estratégico 2011-2020 que establece 20 metas conocidas como las Metas de Aichi, México como firmante y parte de dicho convenio pone en acción la Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (ENBioMex) y Plan de Acción 2016-2030, con el objetivo de atender a las metas planteadas por el CDB y buscando la integración de los programas de conservación y uso sustentable de la biodiversidad en las políticas del país, además de asegurar el reparto justo y equitativo de los recursos, incentivando la participación de la

sociedad en la conservación de los mismos; dicha estrategia está coordinada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (PND, 2013).

El gobierno mexicano como ente regulador y tomador de decisiones sobre el territorio del país, tiene como tarea salvaguardar y asegurar la vida digna de todos sus habitantes, para lograr dicho objetivo, es necesario brindar los recursos naturales necesarios para su supervivencia, dicho esto, México cuenta con múltiples instituciones que en conjunto administran y protegen el territorio y su biodiversidad; con respecto a esta última y ante el reto planteado por el cambio climático global la CONABIO cuenta con un Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) que integra la información sobre todas las colecciones científicas dentro y fuera del territorio, aunada a información cartográfica que contemplan a la biota del país incluyendo datos de las especies en riesgo y extinción, especies endémicas, especies invasoras y aquellas prioritarias para la conservación; esta información sirve como base en los proyectos de manejo y conservación de los ecosistemas mexicanos (PND, 2013).

Además, México cuenta con diagnósticos sobre el estado de conservación de la biodiversidad por estado, permitiendo el monitoreo constante de la misma en cada entidad federativa. Dichos estudios albergan la información de toda la biodiversidad existente en su territorio, al mismo tiempo, las Estrategias para la Conservación y Uso sustentable de la Biodiversidad (ESCUSBE) permiten la identificación de amenazas y estrategias de conservación a una escala regional y a largo plazo (PND, 2013). El acervo de información biológica por parte de instituciones gubernamentales y académicas permite identificar y atender los principales factores antropogénicos responsables de la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas (PND, 2013), no obstante, cabe recalcar la gran importancia de integrar dicha información a la toma de decisiones y políticas públicas del país.

4.7. Conservación de los encinos en América y México

Los encinos en el mundo forman parte de una gran variedad de ecosistemas, desde bosques tropicales hasta matorrales xerófilos (Rzedowski, 1978) jugando un papel dominante en la mayoría de ellos, de ahí su importancia tanto ecológica como económica, factores que a su vez los han convertido en especies amenazadas, pues la pérdida abrupta de los bosques y la sobreexplotación de especies han marcado su supervivencia (Oldfield, 2007). Los encinos han sido ampliamente aprovechados a través del tiempo y en todo el mundo, entre sus principales usos están: materia prima en la construcción, elaboración de herramientas e instrumentos, confección de artesanías, elaboración de muebles, como alimento y usos medicinales (Luna et al, 2003; Arizaga et al., 2009).

En todo el mundo las especies del género *Quercus* han sido amenazadas por el cambio de uso de suelo, la explotación de madera, leña y carbón vegetal (Oldfield, 2007). Además, en la actualidad el género *Quercus* se enfrenta a múltiples amenazas antrópicas que ponen en riesgo la permanencia de su hábitat y a la falta de conocimiento sobre su estado de conservación en el mundo. En este contexto los escenarios para la conservación de los encinos en el continente americano no resultan alentadores. A pesar de los esfuerzos de conservación en los Estados Unidos de América (segundo centro de diversidad en el continente), también se han perdido porciones de bosque ante el alto consumo de bellotas por

mamíferos, incendios forestales, enfermedades y los efectos del cambio climático (Oldfield, 2007).

Por lo tanto, resulta alarmante que, en México, siendo el principal centro de diversidad del género *Quercus* en América (Valencia-A, 2004; Oldfield, 2007), aún no se cuente con programas integrales de gestión, conservación y aprovechamiento de los bosques de encino (Arizaga et al., 2009). A pesar de que la CONABIO (2010) reconoce a los bosques mesófilos de montaña (los cuales representan uno de los principales hábitats de los encinos) como uno de los ecosistemas más amenazados del país (tanto por las actividades antrópicas como por los efectos del cambio climático) y los considera como ecosistemas prioritarios para su conservación, en la actualidad casi el 50% de la cobertura original de bosque en México ha desaparecido por el cambio de uso de suelo, poniendo en riesgo la supervivencia de múltiples especies de encinos mexicanos (Challenger, 1998; CONABIO, 2010).

Aunque en México se cuenta con una buena representatividad del género *Quercus* en herbarios y programas de conservación *ex situ*, además de algunas especies de encino protegidas dentro de ANP y bajo acuerdos por particulares, las especies del género no se encuentran consideradas dentro de la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2010) de especies en riesgo. Estos vacíos sobre el conocimiento del estado de conservación de las especies de encino en México y las amenazas que representa el cambio climático global justifican la necesidad de incrementar los esfuerzos encaminados en generar conocimiento sobre el estado de conservación de todas las especies del género que habitan en el territorio, dado que para poder conservar a dichas especies de manera exitosa es fundamental proteger su hábitat *in situ* (Oldfield, 2007).

Desde mediados del siglo XX los estudios e investigaciones que involucran al género *Quercus* alrededor del mundo se han ido incrementando; su taxonomía e identificación ha sido abordada por múltiples científicos (p. e. C.H. Muller, 1936; W. Trelease, 1924), sin embargo, el estudio de la conservación es un tema reciente, el cual se ha desarrollado en respuesta a la degradación y fragmentación de sus ecosistemas naturales producto de la explotación de las especies de encino a nivel global.

En México las investigaciones sobre el género *Quercus* están concentradas principalmente en estudios forestales y ecológicos; en cuanto a su conservación aún se cuenta con poca información. Si bien una gran parte de los estudios realizados en encinos afirman su importancia como uno de los taxa más importantes en los ecosistemas templados del país y la necesidad de incluir dichas investigaciones en proyectos de manejo y conservación (Zavala Chávez, 1998; Luna et al., 2003; Valencia-A, 2004; Arizaga et al., 2009; Rodríguez-Correa et al., 2015), los estudios dedicados específicamente a la conservación de los encinos son reducidos.

En el 2003, se crea la Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica, encabezada por 8 instituciones de los países de Estados Unidos, México, Guatemala, El Salvador y Nicaragua; dicha alianza busca la conservación y manejo sustentable de los bosques de pino-encino y del ave migratoria *Dendroica chrysoparia* perteneciente a la familia Parulidae; y crea el plan de conservación que abarca desde el centro y sur de Chiapas en México hasta el noroeste de Nicaragua, con este plan se proponen

estrategias de manejo que permitan la supervivencia de los ecosistemas de pino-encino al mismo tiempo que permita el uso sustentable de los recursos para los habitantes de la zona a mediano y largo plazo (Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica, 2008).

En cuanto a instancias particulares, Africam Safari como parque zoológico en Puebla, ha desarrollado un programa de restauración y conservación de encinos en la zona de Valsequillo, área que se vio degradada por actividades de ganadería y agricultura por más de 50 años, actualmente, se llevan a cabo actividades de reforestación y germinado de semillas, dicho programa lleva alrededor de 8 años en funcionamiento (Africam Safari, 2016).

Kappelle (2006) aborda la posibilidad de usar epifitas como emblema para la conservación del bosque de pino-encino en Chiapas; dado que los esfuerzos de conservación en dicho ecosistema han sido fallidos debido al déficit de recursos económicos; Kappelle (2006) encontró que las especies de epífitas son más abundantes en ambientes menos perturbados y en encinos que son manejados, con base en ello, recomienda una tasa de extracción sustentable de los recursos. De igual forma propone usar la popularidad de las epifitas ornamentales para incentivar la participación de la población que hace uso de los recursos naturales de la zona y con ello, indirectamente conservar el bosque de pino-encino.

Torres-Miranda et al. (2011) realizaron un estudio de la distribución y áreas de endemismo de encinos rojos (sección *Lobatae*) en México, con el fin de identificar las áreas de mayor importancia para la conservación de estos; encontraron que las zonas con mayor endemismo de encinos rojos fueron el norte de la Sierra Madre Oriental y las Serranías Meridionales de Jalisco, dichas áreas no están cubiertas en su totalidad por las ANP o programas de conservación, lo cual deja a la deriva a casi el 60% de las especies de encinos rojos que habitan el territorio mexicano.

Toledo-Aceves et al. (2011), CONABIO (2010) y González-Espinosa et al. (2012) han publicado investigaciones sobre la importancia y la conservación de los bosques de niebla en México, que como ya se ha mencionado es uno de los principales hábitats de los encinos (Rzedowski, 1978), en dichas investigaciones se encontró que las principales amenazas para los bosques de niebla son el cambio de uso de suelo y las limitaciones de sus especies para migrar altitudinalmente ante las posibles condiciones de cambio climático. Es necesario implementar programas de conservación que integren a las comunidades que habitan dichos bosques y el manejo sustentable de los recursos, pues la estrategia actual de mantener ANP aisladas no será suficiente para mantener los ecosistemas de bosque nublado en México (González-Espinosa et al., 2012).

Montes-Hernández y López-Barrera (2013) abordan el tema de la conservación de la especie *Quercus insignis*, considerada en peligro crítico en México; en su investigación se identifican las mejores condiciones ambientales para el establecimiento de la especie en ecosistemas perturbados y proponen que las estrategias para su conservación y la de cualquier otra especie de encino, deben enfocarse en árboles adultos ya que la clave para conseguir una restauración exitosa está en contar con bellotas saludables.

En el trabajo “Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México”, Gutiérrez y Trejo (2014) estudian la distribución actual de dos especies de encinos *Quercus laurina* y *Quercus ocoteifolia* y los posibles efectos del cambio climático sobre sus poblaciones y su distribución; estiman que la áreas de distribución de ambas especies se verán reducidas considerablemente, sin embargo, *Quercus ocoteifolia* tendrá una reducción mayor dado que su distribución en la actualidad ya es restringida lo cual significa una mayor sensibilidad a los efectos del cambio climático. La información obtenida en esta investigación representa una pieza clave en la creación de programas de conservación para las especies de encinos que habitan zonas montañosas, ya que se estima que los efectos del cambio climático serán más drásticos en dichas zonas.

En uno de los más recientes estudios, Rodríguez-Correa et al. (2015) estudia los patrones de distribución de los encinos en el neotrópico, así como las áreas de recambio de especies y áreas de endemismo. En dicho estudio se muestra como las áreas de recambio funcionan como barreras de dispersión de encinos y en ocasiones también representan los límites de las áreas de endemismo, dado que dichas áreas de recambio no suelen contar con las condiciones para el establecimiento y desarrollo de encinos, e identifica en México al Istmo de Tehuantepec como una de las principales áreas de recambio de encinos.

4.8. Limitaciones para la conservación de encinos en México

Como se mencionó anteriormente, los estudios y programas especializados en temas de conservación de encinos en México son aún escasos a pesar de la gran importancia ecológica y económica del género *Quercus*. Las altas tasas de explotación de encinos, la deforestación, el cambio de uso de suelo y las implicaciones del cambio climático para sus poblaciones son algunas de las principales amenazas que enfrentan las especies de encino en la actualidad, factores que a su vez significan grandes retos para su manejo y conservación.

Además, Zavala-Chávez (1998) menciona que uno de los impedimentos para la creación de propuestas de conservación de encinos es el grado de desconocimiento sobre la distribución del género a través del territorio mexicano; aunado a esto se encuentra la falta de conocimiento sobre el estado de degradación y conservación de los ecosistemas de encino (González-Espinosa et al., 2012). Por su parte, Valencia-A (2004) agrega los problemas taxonómicos existentes en la identificación de algunas especies de encinos como una limitante, ya que, al no contar con datos confiables para las especies del género, el establecimiento de programas de conservación para los mismos se puede ver afectado.

Dicho esto, la inclusión y reconocimiento de especies de encinos en la categoría de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana 059 (SEMARNAT, 2010), su protección y el establecimiento de áreas de conservación de encinos exitosas a mediano y largo plazo en México, requieren de esfuerzos mayores en la integración y creación de estudios sobre el género *Quercus* y las implicaciones para su desarrollo y permanencia ante las amenazas del cambio climático, además de propuestas de restauración y manejo sustentable de bosques de encino.

5. Materiales y Métodos

5.1. Área de estudio

Este estudio fue realizado sobre el territorio mexicano, el cual cuenta con una superficie de 1 960 189 km² (INEGI, 2019), y alberga una gran diversidad biológica, que se expresa geográficamente con una distribución heterogénea de especies y ecosistemas, que coincide con la complejidad del medio físico, y que a su vez es producto de una larga historia geológica y climática (Espinosa, D. et al., 2008). Dichas características ecológicas en conjunto con las unidades morfológicas del territorio han dado paso a la regionalización de en 19 provincias o regiones biogeográficas para el país (Ramírez, 1899; Arriaga et al., 1997); dichas regiones serán utilizadas como base geográfica para el presente estudio (Fig. 2).

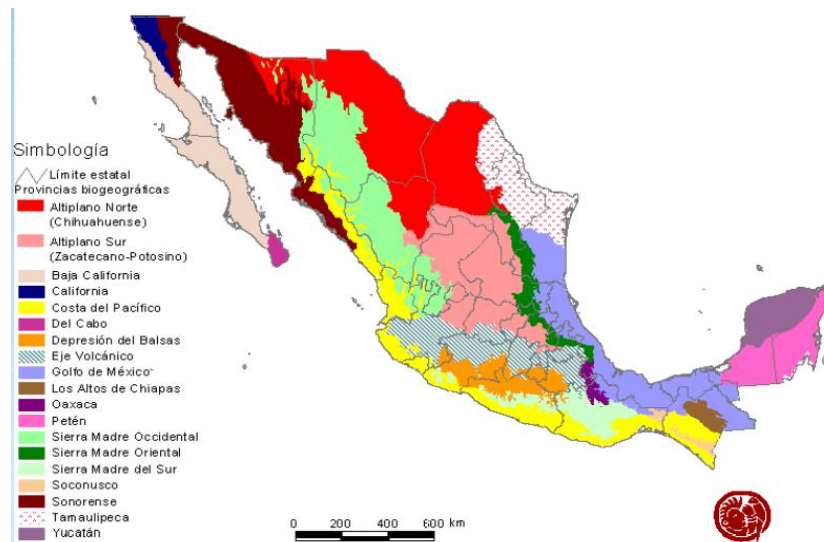


Fig. 2. Provincias biogeográficas de México. Escala 1 : 4 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México (CONABIO, 1997).

5.2. Especies de estudio

Las especies de estudio corresponden a 32 especies del género *Quercus* (Fagaceae), de las cuales 20 pertenecen a la sección *Lobatae*, 11 a la sección *Quercus* y 1 a la sección *Protobalanus*; en cuanto a su distribución, las especies estudiadas abarcan 25 estados del país y 18 de ellas son endémicas de México. De acuerdo con la categorización en la “Red List” de la International Union for the Conservation of Nature (IUCN) y estudios en desarrollo liderados por The Morton Arboretum (Ill, USA) sugieren que de las 32 especies 15 se encuentran clasificadas en “Peligro Crítico” y 17 como “Vulnerables”. Mientras que, las especies categorizadas como “En Peligro” no fueron evaluadas debido a que actualmente se están desarrollando estudios similares por parte de otros autores (H. Rodríguez-Correa *comm. pers.*).

De acuerdo con Valencia-A. (2004) 16 de las especies a estudiar son de distribución media, 11 de distribución restringida, cuatro se distribuyen en solo dos estados y solo una cuenta con distribución amplia media; los estados con el mayor número de estas especies son Oaxaca, Veracruz e Hidalgo. La Tabla 1 presenta la información taxonómica, el estado de conservación y la distribución geográfica de las especies analizadas.

Tabla 1. Listado inicial de las 32 especies de estudio, estado de conservación y su distribución en México.

Baja California Sur: B.C.S., Chiapas: Chis., Chihuahua: Chih., Ciudad de México: CDMX., Coahuila: Coah., Colima: Col., Durango: Dgo., Estado de México: Edo. Mex., Guanajuato: Gto., Guerrero: Gro., Hidalgo: Hgo., Jalisco: Jal., Michoacán: Mich., Morelos: Mor., Nayarit: Nay., Nuevo León: N.L., Querétaro: Qro., Oaxaca: Oax., Puebla: Pue., San Luis Potosí: S.L.P., Sinaloa: Sin., Sonora: Son., Tamaulipas: Tamps., Tlaxcala: Tlax., Veracruz: Ver.

Espece	Autor/Año	Categoría de riesgo	Endémica	Distribución	Altitud (m)
Sección Lobatae					
<i>Quercus acherdophylla</i>	Trel., 1924	CR	Endémica	Hgo., Pue., Oax. y Ver.	2400-2500
<i>Quercus acutifolia</i>	Née, 1801	VU		Gro, Jal, Edo. Mex., Mich., Mor., Nay., Oax. y Pue.	1000-2500
<i>Quercus affinis</i>	Scheidw., 1837	VU	Endémica	Gto., Hgo., N. L., Oax., Pue., Qro., S. L. P., Tamps. y Ver.	1200-2600
<i>Quercus calophylla</i>	Née, 1801	VU		Chih., Chis., CDMX., Dgo., Gro., Hgo., Jal., Edo. Mex., Mor., Nay., Oax., Pue., Sin. y Ver.	1400-2600
<i>Quercus crispipilis</i>	Trel., 1924	VU		Chis.	1800-2420
<i>Quercus devia</i>	Goldman, 1916	VU	Endémica	B. C. S.	2600
<i>Quercus elliptica</i>	Née, 1801	VU		Chis., Gro., Jal., Edo. Mex., Mich., Nay., Oax., Sin. y Ver.	470-2460
<i>Quercus flagellifera</i>	Trel., 1924	VU		Hgo., Pue. y Ver.	1400-2400
<i>Quercus galeanensis</i>	C.H. Mull., 1936	VU	Endémica	N. L.	1200
<i>Quercus graciliformis</i>	C.H. Mull., 1934	CR		Coah., N. L. y Tamps.	0-2100

<i>Quercus hintoniorum</i>	Nixon & C.H. Mull., 1993	VU	Endémica	Coah. y N. L.	2600-3300
<i>Quercus hirtifolia</i>	M.L. Vázquez et al., 2004	CR	Endémica	Hgo. y Pue.	2000-2400
<i>Quercus mulleri</i>	Martínez, 1953	CR	Endémica	Oax.	1000-1800m
<i>Quercus nixoniana</i>	S. Valencia & Lozada-Pérez, 2003	CR	Endémica	Gro., Jal. y Oax.	1300-2300
<i>Quercus paxtalensis</i>	C.H. Mull., 1942	CR	Endémica	Chis., Jal. y Ver.	1000-1500
<i>Quercus pinnativenulosa</i>	C.H. Mull., 1936	CR	Endémica	N. L., Qro., S. L. P., Tamps. y Ver.	800-1600
<i>Quercus sapotifolia</i>	Liebman, 1854	VU		Chis., Oax. y Ver.	1300-2000
<i>Quercus skinneri</i>	Benth., 1841	CR		Chis., Oax., Tamps. y Ver.	700-2200
<i>Quercus uxoris</i>	McVaugh, 1972	CR	Endémica	Col., Gro., Jal., Mich. y Oax.	1500-2200
<i>Quercus xalapensis</i>	Bonpl., 1809	CR		Chis., S. L. P., Tamps. y Ver.	1800
Sección <i>Quercus</i>					
<i>Quercus ajoensis</i>	C.H. Mull., 1954	VU		B. C. S.	500-1500
<i>Quercus deliquescens</i>	C.H. Mull., 1979	VU	Endémica	Chih.	1700-2100
<i>Quercus germana</i>	Schlttdl. & Cham., 1830	CR	Endémica	Hgo., Oax., Pue., S. L. P., Tamps. y Ver.	800-1800
<i>Quercus glabrescens</i>	Benth., 1840	VU	Endémica	CDMX., Hgo., Edo. Mex., Mich., Oax., Pue., S. L. P., Tlax. y Ver.	2450-3300
<i>Quercus hinckleyi</i>	C.H. Mull., 1951	CR		Chih. y Son.	1150-1500
<i>Quercus insignis</i>	M. Martens & Galeotti, 1843	CR		Oax. y Ver.	1500-2000
<i>Quercus macdougalii</i>	Martínez, 1964	CR	Endémica	Oax.	2800-3000

<i>Quercus martinezii</i>	C.H. Mull., 1954	CR	Endémica	Gro., Jal., Edo. Mex., Mich., Nay. y Oax.	1800-2600
<i>Quercus purulhana</i>	Trel., 1924	VU		Chis.	300-1400
<i>Quercus segoviensis</i>	Liebm., 1854	VU		Chis.	760-2500
<i>Quercus subspathulata</i>	Trel., 1924	VU	Endémica	Chih., Jal. y Son.	1500-1600
Sección <i>Protobalanus</i>					
<i>Quercus cedrosensis</i>	C.H. Mull., 1962	VU	Endémica	B. C. S.	1200

5.3. Registro de presencia

Los registros geográficos por localidad de presencia para las 32 especies estudiadas fueron obtenidos de las plataformas Global Biodiversity Information Facility (www.gbif.org) y Tropicos (www.tropicos.org) para el territorio mexicano. Para las especies que no contaban con registros de presencia o para las cuales la información obtenida no representaba la totalidad de su distribución reportada en bibliografía, se realizaron búsquedas de información geográfica por medio de reportes en bibliografía especializada a través de Scopus (www.scopus.com), Google Académico (www.scholar.google.com) y la biblioteca digital de la UNAM (www.bibliotecas.unam.mx). Los registros geográficos fueron compilados en conjunto con información como: especie, estado, municipio, localidad, latitud, longitud, elevación, año de registro y fuente. Los registros que no contaban con coordenadas geográficas, pero si reportaban la localidad de colecta fueron completados por medio de georeferenciación manual a través de Google Earth (2018).

Las bases de datos fueron depuradas de registros geográficos que contaban con una descripción poco precisa de las localidades y registros duplicados, estos últimos se eliminaron de forma manual y por medio de la herramienta *trim duplicates* de ENMTools (Warren et al., 2008). Posteriormente los datos fueron seleccionados de acuerdo con su elevación, usando como referencia la información de distribución reportada por Valencia-A (2004), Oldfield y Eastwood (2007), Arizaga et al. (2009), Vázquez (2011), Mojica y Valencia (2017) y Sabás-Rosales et al., (2017); la elevación de cada registro se obtuvo mediante la capa “Continuo de Elevaciones” (CEM 3.0) (INEGI, 2013). Una vez seleccionados los rangos de elevación por especie se eliminaron todos aquellos registros que se encontraran fuera de los mismos.

Al terminar la depuración de la base de datos, 3 especies fueron descartadas del estudio por contar con pocos o ningún registro de presencia (*Quercus hinckleyi*, *Q. flagellifera* y *Q. mulleri*). De forma complementaria, se realizaron modelos de nicho ecológico preliminares por especie y se compararon con la distribución reportada por Valencia-A (2004), Oldfield y Eastwood (2007) y Arizaga et al. (2009); a partir de dicha comparación se retiraron los

registros ubicados en regiones no reportadas, mientras que aquellas especies con registros dudosos fueron enviadas y examinadas por la Dra. S. Valencia en la Facultad de Ciencias (UNAM), para su posterior ajuste de acuerdo a los comentarios recibidos por la especialista.

5.4. Modelado de Nicho Ecológico

5.4.1. Registros de ocurrencia y variables climáticas

Para la elaboración de los modelos de nicho ecológico para cada especie, primero se obtuvieron las 19 variables bioclimáticas actuales (1970-2000) de WorldClim-Global Climate Data (www.worldclim.org) con una resolución de 30 segundos (~1 km²) para la región B2 (Fick y Hijmans, 2017), que corresponde a México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Cuba, Puerto Rico, Rep. Dominicana, Ecuador, Colombia, Venezuela y cerca de la mitad del territorio de Estados Unidos de América (Tabla 2); de igual manera, se descargaron las variables proyectadas al año 2080 bajo distintos modelos generales de circulación de gases que más adelante se mencionan, correspondientes a los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Las capas climáticas tanto actuales como las proyectadas al periodo 2080 fueron recortadas para México en ArcMap 10.3 (ESRI). Para los modelos de nicho ecológico proyectados al año 2080, se realizó una revisión bibliográfica para elegir los modelos generales de circulación de gases que describen de forma adecuada la heterogeneidad climática del país y que permiten obtener mejores predicciones, así pues, se seleccionaron los modelos Max-Planck-Institute Earth System Model (MPI-ESM-LR) y Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC5) por considerarse como los modelos con mejor rendimiento para las variables bioclimáticas analizadas por Sheffield et al. (2014).

A partir de los registros de presencia para cada especie, se definió su área de accesibilidad o área M, entendida como aquella región donde las especies están, o podrían estarlo con base en el conocimiento previo sobre sus posibilidades de dispersión (Peterson et al., 2005); sobre la cual se realizaron los modelos de nicho ecológico para las condiciones actuales. Para ello, se recortaron polígonos por especie de acuerdo con su distribución dentro de las 19 provincias biogeográficas de México reportadas por la CONABIO (1997) y se obtuvieron las capas bioclimáticas en formato *ascii* para su uso posterior. Para las proyecciones a futuro, se definió el área total de estudio como el espacio geográfico a considerar para la elaboración de los modelos de nicho ecológico, lo anterior con el fin de obtener las áreas idóneas para el establecimiento de las especies ante los cambios ocasionados por el cambio climático bajo los distintos modelos y escenarios, además de obtener información útil para su consideración en planes de manejo y conservación de las especies *in situ* y *ex situ*.

Tabla 2. Variables bioclimáticas. (WorldClim; Fick y Hijmans, 2017)

Variable	Descripción
bio_1	Temperatura media anual
bio_2	Rango de temperaturas diurnas
bio_3	Isotermalidad

bio_4	Estacionalidad en la temperatura
bio_5	Temperatura máxima del mes más cálido
bio_6	Temperatura mínima del mes más frío
bio_7	Rango anual de temperatura
bio_8	Temperatura media del trimestre más lluvioso
bio_9	Temperatura media del trimestre más seco
bio_10	Temperatura media del trimestre más cálido
bio_11	Temperatura media del trimestre más frío
bio_12	Precipitación anual
bio_13	Precipitación del mes más lluvioso
bio_14	Precipitación del mes más seco
bio_15	Estacionalidad en la precipitación
bio_16	Precipitación del trimestre más lluvioso
bio_17	Precipitación del trimestre más seco
bio_18	Precipitación del trimestre más cálido
bio_19	Precipitación del trimestre más frío

La selección de variables bioclimáticas utilizadas para construir el modelo de nicho ecológico se llevó a cabo mediante tres métodos diferentes:

- a. Análisis de correlación de Pearson; con las 19 variables bioclimáticas disponibles en WorldClim (Fick y Hijmans, 2017) se realizó una matriz de correlación de Pearson para cada una de las especies con ayuda del programa RStudio 1.1.447 (RStudio Team, 2015), posteriormente se eliminaron los valores de correlación con una $p > 0.05$ por no considerarse significativos y finalmente con el apoyo de un correlograma se identificaron las variables con valores de $r < |0.7|$ y se seleccionaron aquellas con menor correlación entre sí.
- b. Análisis de componentes principales (PCA); usando las 19 variables bioclimáticas disponibles en WorldClim (Fick y Hijmans, 2017) se les aplicó un análisis de componentes principales con la finalidad de determinar las variables que aportan más información a la variación total y para identificar aquellas variables que proveen información redundante.
- c. MaxEnt; se corrieron modelos preliminares con las 19 variables bioclimáticas disponibles en WorldClim (Fick y Hijmans, 2017), y mediante la prueba de importancia de las variables (Jackknife), se definieron las variables con mayor contribución a cada modelo y se utilizaron las mismas para un análisis de correlación de Pearson con el paquete “corrplot” ver. 0.84 (Wei & Simko, 2017) en la plataforma RStudio 1.1.447 (RStudio Team, 2015),

donde se calcularon las matrices de correlación para cada especie y los valores de p para las mismas, posteriormente se eliminaron los valores de correlación con una $p > 0.05$ por no considerarse significativos y finalmente con el apoyo de un correlograma se identificaron las variables con valores de $r < |0.7|$ y se seleccionaron las variables con menor correlación entre sí.

Posteriormente, se elaboraron los modelos de nicho ecológico para cada especie utilizando las variables definidas por cada uno de los métodos mencionados anteriormente. La elección del juego de variables climáticas definitivas se llevó a cabo comparando el valor del área por debajo de la curva ROC (AUC) (Peterson et al., 2005) de cada modelo que resulta de los análisis estadísticos que realiza MaxEnt (Phillips et al., 2006). La curva ROC muestra el ajuste del modelo en relación con los datos de evaluación y de entrenamiento, describiendo la tasa de identificación correcta de ausencia de errores de omisión contra la tasa de errores de comisión, donde un valor de AUC de 0.5 indica aleatoriedad en los resultados del modelo y valores más cercanos a 1 indican un buen rendimiento para el modelo (Phillips et al., 2006) con base en lo ya mencionado, se eligió el método de selección de variables que presentó los valores más altos de AUC en el modelado de nicho para la mayoría de las especies.

5.4.2. Modelado de nicho ecológico

Una vez definidas tanto las variables climáticas para cada una de las especies como los modelos generales de circulación de gases para las proyecciones a futuro; se generaron los modelos de nicho ecológico utilizando el programa de Maximum Entropy Species Distribution Modeling (MaxEnt 3.4.1; Phillips et al., 2006) con una configuración de un máximo de 1000 iteraciones por modelo, con un límite de convergencia de 0.0001 y valor de regularización de 1, el 70% de los datos fueron destinados de manera aleatoria como datos de entrenamiento y el 30% restante como datos de evaluación, se realizaron 10 réplicas con remuestreo *bootstrap* y se deshabilitaron las opciones para extrapolación y *clamping*. Se indicó al programa que el formato de salida fuera *logistic* que genera valores de idoneidad ambiental entre 0 y 1, lo cual facilita la interpretación del modelo.

Para la validación de los modelos se calculó el área bajo la curva ROC (AUC), bajo la consideración de que valores de AUC superiores a 0.9 se consideran como buenos modelos (Baldwin, 2009). De esta manera, en el programa se modelaron 29 especies con su selección de variables bioclimáticas actuales (1970-2000) dentro de sus áreas de accesibilidad, mientras que para las proyecciones al 2080 se proyectaron las 29 especies con su selección de variables bioclimáticas estimadas para los modelos MPI-ESM-LR y MIROC5 bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5, en toda el área de estudio. Finalmente, se seleccionaron los modelos promedio obtenidos por MaxEnt para la representación gráfica y los análisis descritos a continuación.

5.5. Análisis Geográficos

Para el desarrollo de los análisis geográficos, todas las proyecciones resultantes por MaxEnt fueron convertidas a mapas con valores binarios (1=presencia y 0=ausencia); dicha conversión se realizó utilizando la función *Raster Calculator* del programa ArcMap 10.3 (ESRI) y como umbral se utilizaron los valores máximos de verdaderos positivos y verdaderos negativos (*logistic threshold*) indicados por MaxEnt como “Maximum test

sensitivity plus specificity” para cada especie. Durante este paso una especie (*Q. ajoensis*) no presentó valores que superaran el límite de corte establecido por lo que la especie fue excluida de los análisis. Posteriormente, con el objetivo de identificar las áreas donde ambos modelos de circulación de gases coinciden con idoneidad ambiental para el establecimiento de encinos para el año 2080 y con cada RCP analizado. Se realizaron 2 mapas raster multibandas (RGB), para cada especie; en dichos mapas se introducen tres raster, cada uno representa una banda de distinto color (Red, Green, Blue) y las áreas compartidas muestran una gama de colores dependiendo de las combinaciones.

De esta forma, se obtienen un mapa que contiene la capa de distribución actual de la especie, y las dos proyecciones para el modelo MIROC5 y MPI-ESM-LR con el RCP 4.5; el segundo mapa contiene la capa de distribución actual de la especie, y las dos proyecciones para el modelo MIROC5 y MPI-ESM-LR con el RCP 8.5, ambos mapas para cada una de las especies.

5.5.1. Distribución del nicho ecológico acumulado de las especies

Para el análisis general de la distribución de las condiciones óptimas para el desarrollo de las especies amenazadas del género *Quercus*, se crearon 5 mapas con los datos de distribución acumulada de las 28 especies. Dicho análisis se realizó sumando todas las capas de presencia/ausencia mediante la función *Raster Calculator* en ArcMap 10.3 (ESRI), es decir, se obtuvieron:

- un mapa de la distribución actual acumulada de las 28 especies;
- un mapa de la distribución acumulada proyectada para el año 2080 bajo las condiciones del modelo MIROC5 con el RCP 4.5;
- un mapa con la distribución acumulada proyectada para el año 2080 bajo las condiciones del modelo MIROC5 con el RCP 8.5;
- un mapa con la distribución acumulada proyectada para el año 2080 bajo las condiciones del modelo MPI-ESM-LR con el RCP 4.5; y
- un mapa con la distribución acumulada proyectada para el año 2080 bajo el modelo MPI-ESM-LR con el RCP 8.5.

Todos los mapas elaborados para los análisis aquí mencionados cuentan con el sistema de coordenadas “North America Lambert Conformal Conic”.

5.5.2. Análisis de las estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*

Finalmente, con el objetivo de determinar la representatividad de las 28 especies en las estrategias de conservación en Áreas Naturales Protegidas (ANP) del país, se descargó el mapa de dichas áreas de la página oficial de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP; www.conanp.gob.mx), se superpuso a los mapas acumulativos antes mencionados y se calcularon los tamaños de las áreas de distribución potencial que se encontraban dentro de cada categoría de ANP (Área para la Protección de Flora y Fauna (APFF), Área para la Protección de los Recursos Naturales (APRN), Parque Nacional (PN), Monumento Natural (MN), Reserva de la Biósfera (RB)), esto mediante las funciones *Extract by Mask* y *Calculate Geometry* de ArcMap 10.3, finalmente se identificaron las ANP con mayor hábitat idóneo en las 4 proyecciones analizadas.

De igual forma, se determinó la presencia de Jardines Botánicos (JB) en México para los encinos amenazados; la lista de los 56 jardines botánicos del país así como su ubicación geográfica fue descargada de la página Botanic Gardens Conservation International, GardenSearch (www.bgci.org), para posteriormente incluir dichos puntos en los mapas acumulativos con el fin de estimar la representatividad de esta estrategia de conservación *ex situ* con respecto a los sitios con un mayor grado de idoneidad del hábitat.

Las localidades con mayor riqueza de especies de encino, definidas en lo sucesivo como centros de diversidad, se definieron como aquellas regiones con presencia de más de 5 especies y un área mayor a 100 km². Estas regiones fueron transformadas a polígonos y con la función *Feature to Point* de ArcMap 10.3 (ESRI) se obtuvieron los puntos correspondientes a los centroides de cada centro de diversidad. De igual forma, los centros de mayor riqueza de encinos fueron utilizados para calcular los tamaños de las áreas de la distribución potencial que se encontraban dentro de cada categoría de ANP perteneciente a los mismos, esto con la intención de identificar aquellas ANP que puedan albergar un mayor número de especies de encinos a futuro.

Los puntos correspondientes a los centroides de cada centro de diversidad fueron convertidos en formato KML, para su representación en Google Earth (2019) y finalmente, por medio de este software, se obtuvieron las distancias de las posibles rutas entre los JB y los centroides correspondientes a cada centro de diversidad de encinos por cada región biogeográfica. La estimación de distancia anterior se realizó estimando la longitud de las rutas que permitirían conectar los puntos de origen y destino a partir de las redes de carreteras o caminos disponibles en la región. Por último, para su análisis se asignó una categoría con base en su cercanía a los centros de diversidad, dicha categorización va del 1 al 5 conforme la distancia incrementa cada 100 km, es decir aquellos JB con categoría 1 son los más cercanos (menos de 100 km de distancia), mientras que aquellos con categoría 5 son los más lejanos a los centros de diversidad con hasta 550 km.

5.6. Evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo cambio climático

Con el objetivo de contrastar los resultados del presente estudio sobre los cambios en la distribución de las especies analizadas de encinos amenazados y su vulnerabilidad bajo escenarios de cambio climático con la categorización de riesgo actual en la “RedList”, se obtuvieron los porcentajes de pérdida y/o ganancia del tamaño del nicho ecológico actual de cada especie con respecto a los obtenidos para el año 2080. Ya que los criterios de la IUCN están en función de la reducción de las poblaciones de las especies y no necesariamente de su distribución, para este análisis se consideró que la pérdida de las condiciones idóneas para las especies conlleva a la reducción de las mismas y en base a esto se definieron las especies que cumplen con los criterios para pertenecer o no a las categorías de riesgo como en Peligro crítico y Vulnerables.

Posteriormente, durante la realización del presente estudio, la IUCN realizó una reevaluación de la categorización de las especies de encinos amenazadas y algunas de las especies analizadas cambiaron su categoría de riesgo, por lo que también se contrastaron los resultados obtenidos contra la nueva categorización de estas.

6. Resultados

6.1. Registros de ocurrencia y variables ambientales

Se obtuvieron un total de 3 702 registros definitivos para el modelado de nicho ecológico de 29 de las especies de estudio, mientras que las tres restantes (*Quercus hinckleyi* (0), *Q. flagellifera* (1) y *Q. mulleri* (4)) se descartaron por contar con muy pocos o ningún registro dentro del área de estudio (valores entre paréntesis). En cuanto a la selección de variables, los modelos se elaboraron con las combinaciones de variables bioclimáticas obtenidas por el método MaxEnt, ya que este presentó los valores más altos de AUC en 25 de los 29 modelos de prueba realizados. Finalmente se obtuvieron 5 modelos por especie: un modelo con las condiciones actuales y 4 proyectados al 2080, obteniendo un total de 145 modelos de nicho ecológico.

Tabla 3. Conjunto de variables por especie y número de registros para la elaboración de los modelos de nicho ecológico.

Especie	Variables	No. de registros	Grado de endemismo	Distribución
<i>Q. acherdophylla</i>	bio_4, bio_5, bio_6, bio_8, bio_13, bio_14	19	Endémica	Media
<i>Q. acutifolia</i>	bio_1, bio_2, bio_4, bio_5, bio_6, bio_7, bio_10, bio_11, bio_13, bio_19	499		Media
<i>Q. affinis</i>	bio_2, bio_3, bio_4, bio_6, bio_7, bio_12, bio_13, bio_14, bio_15, bio_18	380	Endémica	Media
<i>Q. calophylla</i>	bio_2, bio_3, bio_4, bio_5, bio_6, bio_7, bio_9, bio_12, bio_15	624		Amplia
<i>Q. crispipilis</i>	bio_2, bio_4, bio_5, bio_6, bio_10, bio_12, bio_15, bio_18	118		Restringida
<i>Q. devia</i>	bio_1, bio_2, bio_3, bio_5, bio_14, bio_15, bio_19	19	Microendémica	Restringida
<i>Q. elliptica</i>	bio_3, bio_4, bio_6, bio_7, bio_10, bio_12, bio_13, bio_15, bio_16	393		Media
<i>Q. galeanensis</i>	bio_7, bio_9, bio_10, bio_13, bio_14, bio_15, bio_19	24	Microendémica	Restringida
<i>Q. graciliformis</i>	bio_6, bio_7, bio_9, bio_11, bio_12, bio_15, bio_16, bio_17, bio_18	5		Media
<i>Q. hintoniorum</i>	bio_3, bio_4, bio_5, bio_8, bio_9, bio_10, bio_11	12	Endémica	Dos estados

<i>Q. hirtifolia</i>	bio_3, bio_5, bio_9, bio_10, bio_13, bio_14, bio_15, bio_18, bio_19	12	Endémica	Dos estados
<i>Q. nixoniana</i>	bio_2, bio_5, bio_7, bio_14, bio_15, bio_18	9	Endémica	Media
<i>Q. paxtalensis</i>	bio_1, bio_2, bio_6, bio_7, bio_12, bio_14, bio_15, bio_17	20	Microendémica	Restringida
<i>Q. pinnativenulosa</i>	bio_1, bio_4, bio_6, bio_10, bio_12, bio_13, bio_18	36	Endémica	Media
<i>Q. sapotifolia</i>	bio_1, bio_2, bio_4, bio_7, bio_12, bio_14, bio_15, bio_19	197		Media
<i>Q. skinneri</i>	bio_1, bio_2, bio_3, bio_7, bio_9, bio_10, bio_12, bio_15, bio_16, bio_19	101		Media
<i>Q. uxoris</i>	bio_1, bio_2, bio_4, bio_6, bio_10, bio_14, bio_15, bio_16	65	Endémica	Media
<i>Q. xalapensis</i>	bio_1, bio_4, bio_6, bio_10, bio_14, bio_17, bio_18	414		Media
<i>Q. ajoensis</i>	bio_2, bio_3, bio_5, bio_7, bio_14, bio_16, bio_18	6		Restringida
<i>Q. deliquescens</i>	bio_1, bio_5, bio_6, bio_7, bio_9, bio_13	8	Microendémica	Restringida
<i>Q. germana</i>	bio_1, bio_3, bio_4, bio_6, bio_9, bio_10, bio_14, bio_15	164	Endémica	Media
<i>Q. glabrescens</i>	bio_3, bio_4, bio_5, bio_7, bio_8, bio_10, bio_11, bio_15, bio_18	136	Endémica	Media
<i>Q. insignis</i>	bio_2, bio_3, bio_4, bio_6, bio_8, bio_10, bio_12, bio_14, bio_19	56		Dos estados
<i>Q. macdougalli</i>	bio_2, bio_4, bio_5, bio_7, bio_8, bio_10, bio_12	10	Microendémica	Restringida
<i>Q. martinezii</i>	bio_1, bio_3, bio_4, bio_5, bio_6, bio_7, bio_10, bio_12, bio_15, bio_16	109	Endémica	Media
<i>Q. purulhana</i>	bio_2, bio_3, bio_4, bio_7, bio_9, bio_15, bio_16, bio_19	18		Restringida
<i>Q. segoviensis</i>	bio_2, bio_4, bio_7, bio_10, bio_12, bio_15, bio_18, bio_19	174		Restringida
<i>Q. subspathulata</i>	bio_4, bio_6, bio_10, bio_14, bio_16, bio_19	54	Endémica	Media

<i>Q. cedrosensis</i>	bio_5, bio_7, bio_8, bio_10, bio_15, bio_16	20	Microendémica	Restringida
-----------------------	---	----	---------------	-------------

6.2. Patrones de distribución del nicho ecológico por especie

A continuación, se muestran los resultados observados en los mapas obtenidos de MaxEnt para la distribución del nicho ecológico actual de cada especie, así como los posibles cambios espaciales o de la extensión de este bajo las condiciones impuestas por las 4 proyecciones analizadas para el año 2080: proyección 1 (MIROC5 RCP 4.5), proyección 2 (MIROC5 RCP 8.5), proyección 3 (MPI-ESM-LR RCP 4.5) y proyección 4 (MPI-ESM-LR RCP 8.5). Dado que los mapas cuentan con un formato logístico con valores de idoneidad ambiental entre 0 y 1; el grado de idoneidad ambiental del nicho ecológico para cada especie, se consideró de la siguiente forma:

Alto= valores mayores a 0.6,
Medio= valores entre 0.3 y 0.6 y;
Bajo= valores entre 0.1 y 0.3.

Posterior a dicha descripción, se reportan los resultados encontrados en los mapas multibandas (RGB), donde se resaltan las áreas donde coincide el nicho ecológico actual y las proyecciones elaboradas con el RCP 4.5 y RCP 8.5, denominadas como áreas estables y aquellas áreas donde dos o más de las proyecciones a futuro coinciden denominadas como áreas potenciales.

Sección *Lobatae*

6.2.1. *Quercus acherdophylla*

En Peligro Crítico; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución del nicho ecológico actual se concentra en la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Trans Mexicana, principalmente en el sur y el noreste respectivamente. Bajo las condiciones de cambio climático de la proyección 1, se mantiene la distribución en el sur de la Sierra Madre oriental, se presenta una mayor distribución en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, además, se muestran áreas con baja idoneidad ambiental en el sureste del Altiplano Sur, los Altos de Chiapas y el noreste de la Sierra Madre del Sur, mientras que en Baja California Norte se presentan altos valores de idoneidad; para la proyección 2, el patrón de distribución encontrado con la proyección 1 se mantiene pero con una disminución en la extensión de la mayoría de las áreas. Bajo las condiciones de la proyección 3, se mantiene la distribución de la proyección 1 y aparecen áreas de idoneidad en el Norte de la Sierra Madre Oriental, dichas distribución se muestra con un menor grado de idoneidad para la especie en comparación con la proyección 1, con excepción de Baja California Norte donde el grado de idoneidad se mantiene y la extensión del área aumenta; bajo la proyección 4, el grado de idoneidad para la especie en toda el área de estudio es baja, con excepción de Baja California Norte donde la idoneidad permanece y el tamaño del área disminuye.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados obtenidos por las multibandas no muestran áreas estables (proyecciones 1 y 3); sin embargo, se encontraron áreas potenciales de idoneidad media en el noreste de Baja California Norte.

RCP 8.5: los resultados para la especie con el RCP 8.5 (proyección 2 y 4) mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (proyección 1 y 3); no se encontraron áreas estables, mientras que las áreas potenciales se identificaron en el noroeste de Baja California Norte.

Las Figuras 1 y 2 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.2. *Quercus acutifolia*

Vulnerable; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución del nicho ecológico actual abarca casi la totalidad de la Sierra Madre del Sur, los Altos de Chiapas, el Soconusco y el sur de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en menor medida se distribuye en el sur de la Sierra Madre Oriental y la Depresión del Balsas. Las 4 proyecciones mostraron resultados muy similares; las proyecciones 1 y 3 mantienen las áreas de idoneidad para el periodo actual, pero con una reducción significativa del tamaño de las mismas, mientras que con las proyecciones 2 y 4 el tamaño de las áreas disminuye y en ambos la idoneidad de condiciones ambientales desaparece en la región de la Depresión del Balsas.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: las proyecciones 1 y 3 muestran una alta cantidad de áreas estables, principalmente en la Sierra Madre del Sur, el Soconusco, el centro de los Altos de Chiapas y el sur de la Faja Volcánica Trans Mexicana; mientras que en cuanto a las áreas potenciales, no se pudieron encontrar.

RCP 8.5: se muestran pequeñas áreas estables en comparación a las arrojadas con las proyecciones 1 y 3, dichas áreas se encuentran en la Sierra Madre del Sur, el sur de Soconusco, centro de los Altos de Chiapas y el suroeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana, además de algunas áreas potenciales en el centro y noreste de la Faja Volcánica Trans Mexicana hasta la Sierra de Juárez.

Las Figuras 3 y 4 ubicadas en el apartado de Anexos representan los resultados recién descritos. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.3. *Quercus affinis*

Vulnerable; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

El nicho ecológico actual de la especie se ubica en la Sierra Madre Oriental, el sureste del Altiplano Sur, el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y el noreste de la Sierra Madre del Sur. Bajo la proyección 1, la idoneidad ambiental en el Altiplano Sur desaparece y en la Sierra Madre Oriental disminuye, mientras que en la Sierra Madre del Sur dicha idoneidad aumenta; en la Faja Volcánica Trans Mexicana la idoneidad ambiental se desplaza desde el este al suroeste y aparece una nueva área idónea en los Altos de Chiapas y en la Sierra Madre Occidental. Con la proyección 2, la mayor parte de la distribución del nicho de la especie desaparece y únicamente permanecen en el sur de la Sierra Madre Oriental (Sierra de Juárez) y el noreste de la Sierra Madre del Sur. A diferencia de la proyección 1 donde el grado de idoneidad aumentó hacia el sur, en el caso de la proyección 3, dicha idoneidad muestra un aumento conforme se avanza hacia el norte de la Sierra Madre Oriental, para esta proyección el resto de la distribución de la especie prácticamente desaparece con excepción de pequeñas áreas en el noreste de la Sierra Madre del Sur. En la proyección 4, la distribución del nicho planteada por la proyección 3 se mantiene y únicamente presenta una disminución en el tamaño de las áreas.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: las áreas estables para esta especie (proyecciones 1 y 3) se encuentran en el norte de la Sierra Madre Oriental y el sureste de esta hasta el noreste de la Sierra Madre del Sur, pasando por la Sierra de Juárez, en cuanto a las áreas potenciales, se pueden observar en el centro de los Altos de Chiapas y en el noroeste de Durango en la región de la Sierra Madre Occidental.

RCP 8.5: para las proyecciones 2 y 4 se encontraron pequeñas áreas estables en el norte y sureste de la Sierra Madre Oriental, así como en el noreste de la Faja Volcánica Trans Mexicana y las Sierra de Juárez en Oaxaca; finalmente, las áreas potenciales se encontraron en el norte de la Sierra Madre Oriental, el noreste de la Sierra Madre del Sur y la zona centro de los Altos de Chiapas.

Las Figuras 5 y 6 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.4. *Quercus calophylla*

Vulnerable; Distribución amplia (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico abarca el sur de la Sierra Madre Oriental, el sur y el suroeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana y casi la totalidad de la Sierra Madre del Sur, los Altos de Chiapas y el Soconusco, además, de un área con bajo grado de idoneidad en el oeste de la Sierra Madre Occidental. Con respecto a los escenarios de cambio climático, las cuatro proyecciones utilizadas en este estudio plantean una reducción del tamaño del área de distribución del nicho ecológico, sin embargo, todos mantienen las áreas donde actualmente se ubica el grado más alto de idoneidad ambiental para la especie. De los dos modelos de circulación utilizados, el MPI-ESM-LR resultó ser el menos pesimista con ambos RCP (4.5 y 8.5), siendo el que estima una menor pérdida del área de distribución actual del nicho ecológico de la especie.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados que se observaron (proyecciones 1 y 3) muestran áreas estables en el oeste y sur de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en el sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y en el centro de los Altos de Chiapas; en cuanto a las áreas potenciales, no se identificaron.

RCP 8.5: se muestran áreas estables con un menor tamaño a diferencia de las observadas con las proyecciones 1 y 3, dichas áreas se ubican en el centro de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en el centro y sur de la Sierra de Juárez, el centro y este de la Sierra Madre del Sur, en el Soconusco y el centro de los Altos de Chiapas; mientras que las áreas potenciales se identificaron en la mitad este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en el noreste de la Sierra Madre del Sur y en el sur de la Sierra de Juárez.

Las Figuras 7 y 8 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.5. *Quercus crispipilis*

Vulnerable; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico se concentra en el Soconusco y en los Altos de Chiapas principalmente. En las proyecciones 1, 2 y 3, las áreas de idoneidad ambiental en el Soconusco desaparecen y en la región de los Altos de Chiapas disminuyen drásticamente, mientras que aparecen pequeñas áreas de idoneidad media en el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en la Sierra Juárez y en el este de la Sierra Madre del Sur. Finalmente, la proyección 4, resulta ser el más dramático ya que la idoneidad ambiental de la especie desaparece prácticamente del país.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie se encontraron áreas estables únicamente en el oeste de los Altos de Chiapas, además, se encontraron áreas potenciales de menor tamaño, dichas áreas se ubican a lo largo de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en el sur de la Sierra Madre Oriental, en la Sierra de Juárez y el este de la Sierra Madre del Sur.

RCP 8.5: los resultados para la especie (proyecciones 2 y 4) mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (proyecciones 1 y 3); para ambos RCP's las áreas estables se ubican en el oeste de los Altos de Chiapas, mientras que, al igual que con las proyecciones 1 y 3, se cuenta con áreas potenciales a lo largo de la Faja Volcánica Trans Mexicana, pero con un tamaño menor.

Las Figuras 9 y 10 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.6. *Quercus devia*

Vulnerable; Microendémica, Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico se concentra específicamente en la región del Cabo en Baja California Sur, mientras que los resultados observados en las 4 proyecciones, indican que el grado de idoneidad ambiental dentro de la distribución actual del nicho ecológico se reducirá de manera drástica, sin embargo, en todas las proyecciones realizadas, aparecen nuevas áreas idóneas a lo largo del norte y centro del país; para las proyecciones 3 y 4, la idoneidad ambiental se extiende en pequeñas áreas desde el Altiplano Norte hasta el Soconusco y los Altos de Chiapas, en comparación con las proyecciones 1 y 2 donde si bien las áreas cuentan con una mayor grado de idoneidad ambiental, éstas llegan únicamente hasta la Sierra Madre del Sur.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie no se encontró ninguna área estable, sin embargo, se encontraron 3 áreas potenciales de tamaño muy reducido ubicadas en el centro de la Sierra Madre Occidental y en el suroeste y sureste de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

RCP 8.5: al igual que con el RCP 4.5 (proyecciones 1 y 3), para esta especie no se encontraron áreas estables, únicamente se pudieron identificar dos pequeñas áreas potenciales ubicadas en el centro de la Faja Volcánica Trans Mexicana y en el este de Durango que se encuentra en la región de la Sierra Madre Occidental.

Las Figuras 11 y 12 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.7. *Quercus elliptica*

Vulnerable; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se encuentra principalmente en Los Altos de Chiapas, El Soconusco, la Sierra de Juárez en Oaxaca, el oeste y noreste de la Sierra Madre del Sur y la región de la Costa del Pacífico en el este de Jalisco y el sur de Nayarit. Las 4 proyecciones a futuro muestran una disminución significativa en el tamaño de las áreas de distribución del nicho ecológico y un aumento en el grado de idoneidad ambiental en las mismas; la disminución del tamaño de las áreas aumenta con los RCP más drásticos (proyecciones 2 y 4).

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie podemos encontrar múltiples áreas estables ubicadas a lo largo de la Sierra Madre del Sur, al igual que en la Sierra de Juárez y en el Soconusco, en el suroeste de los Altos de Chiapas, el centro de Michoacán y suroeste del Estado de México en la región de la Faja Volcánica Trans Mexicana y en el este de Jalisco perteneciente a la región de la Costa del Pacífico; además, en el sur de Oaxaca se encontró una pequeña área potencial.

RCP 8.5: de acuerdo a los resultados se pueden observar áreas estables en el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, en el centro de los Altos de Chiapas, y el sureste del Soconusco. Finalmente, se identificaron áreas potenciales en el centro de Michoacán perteneciente a las regiones de la Faja Volcánica Trans Mexicana,

en el sur de la Sierra de Juárez, el este de la Sierra Madre del Sur y el centro de los Altos de Chiapas se.

Las Figuras 13 y 14 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.8. *Quercus galeanensis*

Vulnerable; Microendémica; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

Los resultados obtenidos muestran una distribución actual del nicho ecológico en el Sur de la Sierra Madre Oriental únicamente, mientras que para la proyección 1 desaparecen las áreas del nicho ecológico actual y aparecen pequeñas áreas con idoneidad ambiental en la Faja Volcánica Trans Mexicana en el norte de Guanajuato y Puebla, además de áreas de menor tamaño en el Sur de Coahuila y Norte de Zacatecas. La proyección 2 indica que la idoneidad ambiental para el establecimiento de la especie casi desaparece en su totalidad con excepción de áreas muy pequeñas en el centro del Altiplano Sur y el Sur de la Sierra Madre Oriental. La proyección 3 muestra áreas pequeñas con idoneidad ambiental en el este del Altiplano Norte, oeste de la región Tamaulipeca y el norte de la Sierra Madre Oriental. Por último, la proyección 4, también indica que la idoneidad ambiental para la especie casi desaparece en el país con excepción de una muy pequeña área en el sureste del Altiplano Sur en el estado de Zacatecas.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados indican que esta especie no cuenta con áreas idóneas para su establecimiento para el año 2080 bajo ninguna de las proyecciones.

RCP 8.5: se identificaron únicamente algunas áreas estables pequeñas y dispersas al norte de la Sierra madre Occidental y al noreste del Altiplano Sur en el centro del estado Nuevo León.

Las Figuras 15 y 16 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.9. *Quercus graciliformis*.

En peligro crítico; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se encuentra en el este del Altiplano Norte y Sur y en la Sierra Madre Oriental casi en su totalidad. La proyección 1 conserva la distribución actual del nicho ecológico en las áreas del este del Altiplano Norte y pequeñas áreas del Altiplano Sur y la Sierra Madre Oriental, mientras que la especie aparece en gran medida en la región Tamaulipeca y el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana. La proyección 2 también muestra áreas de idoneidad en el este del Altiplano Norte y el oeste de la región Tamaulipeca, además de algunas áreas en el centro del Altiplano Sur y el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Para la proyección 3, las áreas de idoneidad ambiental de la

especie se encuentran principalmente en el este del Altiplano Norte, la región Tamaulipeca, el Altiplano Sur y el sur de la Sierra Madre Oriental. Por último, la proyección 4, muestra la mayor disminución del área de distribución del nicho ecológico de la especie, con áreas idóneas para su establecimiento únicamente en el este del Altiplano Norte y algunas áreas con menor grado de idoneidad en el Altiplano Sur y el Sur de la Sierra Madre Occidental.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: Los resultados indican que esta especie bajo las proyecciones 1 y 3 presentan áreas con idoneidad ambiental en el futuro, sin embargo, ninguna de ellas coincide con la distribución actual del nicho ecológico de la misma.

RCP 8.5: Los resultados con las proyecciones 2 y 4 son más desalentadores, ya que no se encontraron áreas con idoneidad ambiental en ninguna de las 2 proyecciones para el año 2080.

Las Figuras 17 y 18 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.10. *Quercus hintoniorum*

Vulnerable; Endémica; Distribución en dos estados (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

El modelo de nicho ecológico para el periodo actual muestra a la especie únicamente en el sur y norte de la Sierra Madre Oriental. Las proyecciones 1 y 3, muestran una disminución de las áreas de distribución actual del nicho ecológico, además, se muestran pequeñas áreas con idoneidad ambiental en el centro de la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Trans Mexicana. La proyección 2 mantiene la distribución de las proyecciones 1 y 3 pero con una disminución en el tamaño de las áreas, mientras que en la proyección 4, la idoneidad ambiental para la especie desaparece del área de estudio con excepción de una pequeña área en el norte de la Sierra Madre Oriental.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie se encontraron áreas estables muy pequeñas y aisladas entre sí, dichas áreas se identificaron en el norte y sur de la Sierra Madre Oriental, además, se encontraron áreas potenciales en el oeste de la Sierra Madre Occidental y a lo largo de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

RCP 8.5: para esta especie solo se pudieron identificar pequeñísimas áreas estables en el norte de la Sierra Madre Oriental, además se encontraron áreas potenciales con mayor tamaño en el suroeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Las Figuras 19 y 20 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.11. *Quercus hirtifolia*

En peligro crítico; Endémica; Distribución en dos estados (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos.

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se ubica únicamente en el sur de la Sierra Madre Oriental, mientras que las 4 proyecciones elaboradas concuerdan en un aumento del tamaño de la misma. Las proyecciones 1 y 2, muestran áreas con idoneidad ambiental para la especie en el sur de la Sierra Madre Oriental, los Altos de Chiapas, la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Juárez en Oaxaca y algunas áreas pequeñas, pero con alto grado de idoneidad ambiental en la Faja Volcánica Trans Mexicana. Las proyecciones restantes (3 y 4), muestran a la especie potencialmente desde el Sur de la Sierra Madre Oriental hasta el este de la Sierra Madre del Sur, pasando por la Sierra de Juárez, también se pueden encontrar áreas de idoneidad en los Altos de Chiapas y con menor tamaño en la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: de acuerdo a los resultados analizados se identificó a la región sur de la Sierra Madre Oriental como área estable de la especie; además se identificaron áreas potenciales en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y el este de la Sierra Madre del Sur.

RCP 8.5: para esta especie se identificó una pequeñísima área estable en el suroeste de la Sierra Madre Oriental; por último, se identificaron áreas potenciales en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y el sureste de la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 21 y 22 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.12. *Quercus nixoniana*

En peligro crítico; Endémica, Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie abarca la Sierra Madre del Sur y el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Todas las 4 proyecciones a futuro presentaron un aumento drástico del tamaño del nicho ecológico de la especie, contando con áreas de alta idoneidad ambiental en las regiones centro y sur de la Costa del Pacífico y del Golfo de México, el noreste de Yucatán y en menor medida en el sur del Soconusco; en el caso de la proyección 4, se encontraron áreas de alta idoneidad ambiental en la región de Petén.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: Los resultados arrojaron que, para esta especie, aunque existen áreas con idoneidad ambiental en el futuro bajo la proyección 1, no se encontraron áreas estables.

RCP 8.5: Las proyecciones 2 y 4 tampoco presentaron áreas estables o idóneas para su establecimiento bajo ninguna de las dos proyecciones mencionadas.

Las Figuras 23 y 24 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.13. *Quercus paxtalensis*

En peligro crítico; Microendémica; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

De acuerdo con el modelo de nicho ecológico actual, la especie se encuentra desde el centro de la Sierra Madre Oriental, bajando por la Sierra de Juárez, el este de la Sierra Madre del Sur, hasta los Altos de Chiapas. Las proyecciones 1 y 4 coinciden en las áreas de idoneidad ambiental como pequeños puntos dispersos y aislados en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Juárez en Oaxaca, el Soconusco y los Altos de Chiapas; mientras que la proyección 2, mantiene las mismas regiones de distribución de las áreas idóneas que las proyecciones anteriores, pero con una menor cantidad de puntos. Por último, la proyección 3, mantiene la distribución del nicho ecológico actual y muestra áreas con un grado de idoneidad ambiental medio en la Faja Volcánica Trans Mexicana, el Altiplano Sur así como en la Sierra Madre del Sur.

Descripción compilada de los modelos.

RCP 4.5: para esta especie podemos encontrar múltiples áreas estables ubicadas desde la Sierra Madre Oriental hasta el este de la Sierra Madre del Sur pasando por la Sierra de Juárez, el sur de Tamaulipas en la región del Golfo de México, en los Altos de Chiapas y el Soconusco; en cuanto a las áreas potenciales, se encontraron en el noroeste de Baja California y en sur del mismo estado en la región del Cabo, en la Sierra Madre Occidental, el noreste del Altiplano Chihuahuense, en el Altiplano Sur, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre del Sur y el Soconusco.

RCP 8.5: los resultados para la especie bajo las proyecciones 2 y 4 mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (proyección 1 y 3), para el caso de las áreas estables, se encontraron áreas en las mismas regiones mencionadas, con excepción de la región del Soconusco; por último, las áreas potenciales se encontraron en el noreste de Baja California y el sur de la región del Cabo, en la Sierra Madre Occidental, el norte de la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur y el Soconusco.

Las Figuras 25 y 26 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.14. *Quercus pinnativenulosa*

En peligro crítico; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La especie cuenta con una distribución del nicho ecológico en la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Juárez en Oaxaca. La proyección 1 mantiene la misma distribución del nicho ecológico actual y muestra nuevas áreas con idoneidad ambiental en el oeste de la Sierra Madre Occidental y en la región del Cabo en Baja California Sur; para la proyección 2 las áreas de distribución actual del nicho ecológico se ven ligeramente reducidas en tamaño, conservando las regiones de distribución y aparecen nuevas áreas con idoneidad ambiental

en el oeste de la Sierra Madre Occidental y de la Faja Volcánica Trans Mexicana, mientras que los modelos restantes (3 y 4) muestran la misma distribución del nicho ecológico que la proyección 2, pero con áreas de menor tamaño.

Descripción compilada de los modelos.

RCP 4.5: para esta especie se encontraron áreas estables en todo lo largo de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez y el sur de Tamaulipas perteneciente a la región del Golfo de México; además se encontraron áreas potenciales con gran tamaño, ubicadas en el sur de Baja California correspondiente a la región del Cabo, en la Sierra Madre Occidental, en el sur del Altiplano Sur, la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, el sur de la Sierra de Juárez, el este de la Sierra Madre del Sur, los Altos de Chiapas y el Soconusco.

RCP 8.5: los resultados para la especie bajo las proyecciones 2 y 4 mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (proyecciones 1 y 3), ya que en ambos casos las regiones donde se identificaron áreas estables y potenciales coinciden con las ya mencionadas para el RCP 4.5.

Las Figuras 27 y 28 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.15. *Quercus sapotifolia*

Vulnerable; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico se ubica en los Altos de Chiapas, el Soconusco y el sur de la Sierra Madre Oriental. Los resultados con las proyecciones 1 y 4 indican que la especie conservará la distribución del nicho en las regiones actuales, aunque sí se presentará una reducción en el tamaño de las áreas, además de presentar nuevas áreas pequeñas y aisladas en la Faja Volcánica Trans Mexicana y la Sierra Madre del Sur; la proyección 2 muestra la misma distribución del nicho que las proyecciones 1 y 4, con excepción de las áreas en la región de la Sierra Madre Oriental, dichas áreas desaparecen. Por último, la proyección 3 también mantiene las áreas de distribución del nicho ecológico para el periodo actual con excepción de la región de la Sierra Madre Oriental, donde el grado de idoneidad incrementa y se extiende hasta la Sierra de Juárez en Oaxaca.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie las áreas estables fueron identificadas en el sur de la Sierra Madre Oriental, el norte de la Sierra de Juárez, los Altos de Chiapas, el sur del Soconusco y pequeñas áreas en el este de la Sierra Madre del Sur, en cuanto a las áreas potenciales, no se encontraron.

RCP 8.5: los resultados para esta especie muestran áreas estables en la Sierra Madre del Sur, el Soconusco, la Sierra de Juárez y los Altos de Chiapas; finalmente, únicamente se encontró una pequeña área potencial en el sur de la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 29 y 30 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.16. *Quercus skinneri*

En peligro crítico; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

Los resultados obtenidos indican una distribución actual del nicho ecológico en el sur de los Altos de Chiapas, el Soconusco, la Sierra de Juárez y unas pequeñas áreas en el centro de la región del Golfo de México. Todas las proyecciones realizadas para esta especie conservan el grado de idoneidad ambiental que el nicho ecológico del periodo actual en el oeste y centro de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en el sur de la Sierra Madre Oriental y a lo largo de la Sierra Madre del Sur y coinciden en un aumento de la distribución del mismo, únicamente varía la extensión de las áreas entre proyecciones.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie las áreas estables se ubican en el sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, los Altos de Chiapas, el Soconusco, el suroeste de Veracruz en la región del Golfo de México y el sureste de Oaxaca en la región de la costa del Pacífico, por último, se identificaron varias áreas potenciales en el sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur y el norte del Soconusco.

RCP 8.5: en este caso la distribución de las áreas estables entre las proyecciones 1 y 3 y la distribución actual del nicho ecológico ya mencionadas y las áreas estables entre las proyecciones 2 y 4 y la distribución actual del nicho ecológico resultaron iguales; mientras que las áreas potenciales se ubican en el sur de la Sierra Madre Oriental, el centro de la Faja Volcánica Trans Mexicana y la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 31 y 32 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.17. *Quercus uxoris*

En peligro crítico; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución del nicho ecológico de la especie para el periodo actual abarca al oeste y sur de la Sierra Madre del Sur y el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana. La proyección 1 muestra que las áreas con idoneidad en la Sierra Madre del Sur se mantienen y aparecen nuevas en el Soconusco, la Sierra de Juárez y en mayor medida en el oeste de la Sierra Madre Occidental. La proyección 2 arrojó áreas idóneas de menor tamaño en el sur de la Sierra Madre Oriental, el oeste de la Sierra Madre Occidental, en la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y en menor medida en los Altos de Chiapas. Los resultados de la proyección 3 muestran a la especie en el oeste de la Sierra Madre Occidental, en la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y con áreas de menor tamaño en los Altos de Chiapas y el sur de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Por último, la proyección 4 cuenta con una menor cantidad de

áreas idóneas para el establecimiento de la especie y de menor tamaño en el oeste de la Sierra Madre Occidental, en la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Juárez, el Soconusco y los Altos de Chiapas.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: las áreas estables para esta especie se identificaron en la Faja Volcánica Trans Mexicana y la Sierra Madre del Sur, mientras que las áreas potenciales se encontraron dispersas en el oeste de la Sierra Madre Occidental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y el oeste de los Altos de Chiapas.

RCP 8.5: los resultados para la especie mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (1 y 3), las áreas estables se ubican en el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana y en la Sierra Madre del Sur; por último, con las proyecciones a futuro se encontraron áreas potenciales en las mismas regiones ya mencionadas con el RCP 4.5 para este caso.

Las Figuras 33 y 34 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.18. *Quercus xalapensis*

En peligro crítico; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se concentra en la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Juárez en Oaxaca. Los resultados de la proyección 1 muestran una reducción de las áreas idóneas para su establecimiento, pero conserva la distribución del nicho ecológico actual y aparecen nuevas áreas con idoneidad ambiental en el oeste de la Sierra Madre Occidental; de igual manera la proyección 2 conserva la distribución del nicho ecológico actual y muestra otras áreas con idoneidad ambiental en los Altos de Chiapas. Para la proyección 3, las áreas de idoneidad ambiental desaparecen de la Sierra de Juárez y se pueden encontrar algunas únicamente en el centro-sur de la Sierra Madre Oriental. Por último, la proyección 4 resulta ser la más pesimista puesto que la idoneidad ambiental para la especie se reduce a unas cuantas regiones del centro y sur de la Sierra Madre Oriental.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: de acuerdo con los resultados analizados se identificaron a la región sur de la Sierra Madre Oriental y a la Sierra de Juárez en Oaxaca como áreas estables, para el caso de las áreas potenciales, se identificaron algunas en el este de la Sierra Madre Occidental y el sur de la Sierra Madre Oriental.

RCP 8.5: en este caso las áreas estables, coincidieron con los resultados para el RCP 4.5 (proyecciones 1 y 3), con la única excepción de que las áreas estables cuentan con un tamaño más reducido que las ya mencionadas, por último, para las dos proyecciones a futuro se identifican pequeñas áreas potenciales en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y los Altos de Chiapas.

Las Figuras 35 y 36 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

Sección *Quercus*

6.2.19. *Quercus ajoensis*

Vulnerable. Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie abarca las regiones biogeográficas de Baja California y el este de la región Sonorense. Las cuatro proyecciones realizadas tienen resultados similares para esta especie, coincidiendo con áreas de idoneidad ambiental para su establecimiento desde la región central del país, hasta la región norte, abarcando los estados de Michoacán, Hidalgo, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Durango, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamiaco; si bien, dicha idoneidad es de media a baja, en zonas como la Sierra Madre Occidental y el Altiplano Norte, el grado de idoneidad ambiental es alta para las cuatro proyecciones.

Como se mencionó anteriormente, esta especie fue excluida del análisis multibanda al no presentar valores positivos de idoneidad durante su conversión a valores binarios, por lo tanto, no se cuenta con un análisis compilado de los modelos.

La Figura 37 ubicada en el apartado de Anexos representa los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.20. *Quercus deliquescens*

Vulnerable; Microendémica; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se ubica en el norte de la región del Altiplano Chihuahuense y de la Sierra Madre Oriental, y en algunas zonas del Altiplano Sur. Los resultados de las proyecciones 1, 2 y 3 coinciden en la distribución de las áreas con idoneidad ambiental para su establecimiento y únicamente difieren en el tamaño de las mismas, dicha distribución se ubica en el norte de la Baja California, el noroeste del Altiplano Chihuahuense, el noreste de la Sierra Madre Occidental y pequeñas áreas en el norte de la Sierra Madre Oriental y el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Por último, los resultados del modelo 4 indican que la idoneidad ambiental para su establecimiento prácticamente desaparece del país, mostrando relictos en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, el norte de Baja California, de la Sierra Madre Oriental y el Altiplano Chihuahuense.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados para esta especie muestran áreas estables en el norte del Altiplano Chihuahuense, a lo largo del este de la Sierra Madre Occidental y con áreas más pequeñas en el norte de la Sierra Madre Oriental y en el sureste del Altiplano Sur, además, se identificaron

áreas potenciales en el norte de Baja California Norte, el norte del Altiplano Norte, en el centro de la Sierra Madre Occidental y el noreste de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

RCP 8.5: se identificaron áreas muy pequeñas y aisladas que coinciden con las áreas estables en el norte del Altiplano Chihuahuense, el centro y noreste de la Sierra Madre Occidental y en el norte la Sierra Madre Oriental; finalmente, entre las dos proyecciones se identificaron pequeñas áreas potenciales en el norte de Baja California Norte, en el norte y centro de la Sierra Madre Occidental y en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Las Figuras 38 y 39 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.21. *Quercus germana*

En peligro crítico; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie va desde el centro de la Sierra Madre Oriental y hasta la Sierra de Juárez en Oaxaca. Los resultados para las 4 proyecciones muestran resultados similares entre sí: la distribución del nicho ecológico de la especie disminuye de forma drástica (en mayor medida en las proyecciones 3 y 4); las 4 proyecciones coinciden en que la idoneidad ambiental en la Sierra de Juárez desaparece y en el norte de la Sierra Madre Oriental el grado de idoneidad ambiental es muy bajo.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados muestran áreas estables en el centro y sur de la Sierra Madre Oriental, el oeste de la región del Golfo de México en Veracruz y en el norte de la Sierra de Juárez; en cuanto a las áreas potenciales, se identificaron áreas con menor tamaño en el centro de la Sierra Madre Oriental, en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y el noreste de la Sierra Madre del Sur.

RCP 8.5: de acuerdo a los resultados se pueden observar únicamente pequeñas áreas estables en el sur de la Sierra Madre Oriental y el norte de la Sierra de Juárez, mientras que para las áreas potenciales se identificaron áreas en el sur de la Sierra Madre Oriental, el noreste de la Faja Volcánica Trans Mexicana y pequeñas áreas en el norte de los Altos de Chiapas.

Las Figuras 40 y 41 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.22. *Quercus glabrescens*

Vulnerable; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se encuentra principalmente en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, el sur de la Sierra Madre Oriental y en algunas áreas de la Sierra de Juárez en Oaxaca y el este de la Sierra Madre del Sur. En cuanto a las proyecciones a futuro, las proyecciones 1 y 3 mostraron que la idoneidad ambiental en la

distribución actual del nicho ecológico prácticamente desaparece para el futuro, únicamente se mantienen pequeñas áreas con idoneidad ambiental en el centro y este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y el Sur de la Sierra Madre Oriental, mientras que en el norte de Baja California aparecen nuevas áreas con alto grado de idoneidad ambiental. Para las proyecciones 2 y 4, los resultados son más drásticos, mostrando pocas y muy pequeñas áreas aisladas con idoneidad ambiental en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, además de algunas áreas en el norte de Baja California.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie se encontraron áreas estables en el sureste del Altiplano Sur, el sur de la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Trans Mexicana y el noreste de la Sierra Madre del Sur; en cuanto a las áreas potenciales solo se pudieron encontrar algunas en el norte de Baja California.

RCP 8.5: de acuerdo a los resultados se pueden observar pequeñas áreas estables en el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana y de la Sierra Madre del Sur; para las áreas potenciales se encontraron en el norte de Baja California al igual que con el RCP 4.5.

Las Figuras 42 y 43 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.23. *Quercus insignis*

En peligro crítico; Distribución en dos estados (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se encuentra en el sur de la Sierra Madre Oriental, en la Sierra de Juárez, los Altos de Chiapas y el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Las proyecciones 1 y 2 concuerdan en un aumento de la distribución del nicho de la especie, abarcando nuevas áreas en el este y oeste de la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y pequeñas áreas del oeste de la Sierra Madre Occidental. En cuanto a la proyección 3, muestra una reducción del nicho de la especie, con áreas idóneas para su establecimiento únicamente en el sur de la Sierra Madre Oriental, hasta el este de la Sierra Madre del Sur y los Altos de Chiapas. Por último, la proyección 4 también muestra un aumento en la distribución del nicho ecológico, manteniendo las áreas del presente con un mayor grado de idoneidad ambiental y agregando pequeñas áreas en la Sierra Madre Occidental que corresponden al este de Durango.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados muestran áreas estables para la especie en el sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, el este de la Sierra Madre del Sur, el norte del Soconusco y los Altos de Chiapas; en cuanto a las áreas potenciales, se identificaron en el este de la Sierra Madre del Sur y el norte del Soconusco.

RCP 8.5: los resultados para la especie bajo las proyecciones 2 y 4 mostraron un resultado muy similar a los resultados del RCP 4.5 (proyecciones 1 y 3); las áreas estables se ubican en el sur de la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, el este de la Sierra Madre del Sur y

los Altos de Chiapas; finalmente, las áreas potenciales únicamente se identificaron en el este de la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 44 y 45 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.24. *Quercus macdougalli*

En peligro crítico; Microendémica; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

El modelo de nicho ecológico para el periodo actual se muestra principalmente en la Sierra de Juárez en Oaxaca y pequeñas áreas en el este de la Sierra Madre del Sur. Los resultados observados en las proyecciones 1 y 2 indican que la idoneidad ambiental para el establecimiento de la especie prácticamente desaparece del país con la excepción de un área idónea muy reducida en el Sur de Oaxaca; mientras que las proyecciones 3 y 4 muestran pequeñas áreas muy aisladas con idoneidad ambiental en la Sierra Madre del Sur y áreas aún más reducidas en la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie solo se pudieron identificar pocas áreas estables con un tamaño muy reducido en el sur de la Sierra Madre Oriental y en el sureste de la Sierra Madre del Sur; para esta especie no se encontraron áreas potenciales.

RCP 8.5: en este caso la especie no cuenta con áreas de presencia para la proyección 4 por lo que solo se pudo identificar una pequeña área estable entre la proyección 2 y la distribución actual del nicho ecológico en el sur de la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 46 y 47 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.25. *Quercus martinezii*

En peligro crítico; Endémica; Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie abarca principalmente el oeste de la Sierra Madre del Sur y con menor grado de idoneidad la Faja Volcánica Trans Mexicana. La proyección 1, muestra que la distribución actual del nicho ecológico disminuye, conservando sólo algunas áreas de la Sierra Madre del Sur y el oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana. Las proyecciones 2 y 4 obtuvieron resultados similares, donde se mantienen pocas áreas en la Faja Volcánica Trans Mexicana y aparecen pequeñas áreas en el centro de la Sierra Madre Occidental, mientras que las áreas en la Sierra Madre del Sur prácticamente desaparecen; en la proyección 3 se comparte la distribución del nicho ecológico con las proyecciones 2 y 4, con excepción de que las áreas en la Sierra Madre del Sur lucen similares a la distribución actual y aparecen nuevas en la Sierra de Juárez en Oaxaca.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: de acuerdo a los resultados obtenidos, se pudieron identificar pequeñas áreas estables en el centro de la Sierra Madre del Sur y en el centro y oeste de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en cuanto a las áreas potenciales, no se encontraron para esta especie.

RCP 8.5: para esta especie se encontraron áreas estables en el centro de la Faja Volcánica Trans Mexicana y en el este de la Sierra Madre del Sur, mientras que las áreas potenciales solo se encontraron en la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Las Figuras 48 y 49 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.26. *Quercus purulhana*

Vulnerable; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se muestra principalmente en los Altos de Chiapas, en la zona centro de la región del Golfo de México y en el sur de la región Costa del Pacífico en los estados de Oaxaca y Chiapas. Las proyecciones 1 y 2, coincidieron en un aumento significativo del área de distribución del nicho de la especie, encontrando áreas con idoneidad ambiental a lo largo de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y los Altos de Chiapas; mientras que las proyecciones 3 y 4 coinciden en las regiones de distribución del nicho ecológico de las proyecciones 1 y 2 con excepción de la aparición de algunas áreas con alto grado de idoneidad ambiental en el norte y sur de la Sierra Madre Oriental.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados muestran áreas estables para la especie en el centro de Veracruz y el centro de Chiapas y el este de Tabasco, todos correspondientes a la región del Golfo de México, también en el sureste de Oaxaca en la región de la Costa del Pacífico y en los Altos de Chiapas; además, se encontraron múltiples áreas potenciales de gran extensión, en la Sierra Madre Oriental, el sur de la Sierra Madre Occidental, el sur del Altiplano Sur, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Depresión del Balsas, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el sur de la Costa del Pacífico, el Soconusco, el este de la región de Petén y el noreste de Yucatán.

RCP 8.5: en cuanto a las áreas estables, se identificaron en el sureste de Veracruz, Oaxaca y Chiapas pertenecientes a la Costa del Pacífico y en los Altos de Chiapas; finalmente, para el caso de las áreas potenciales, las regiones donde se encuentran dichas áreas corresponden a las mismas observadas por las proyecciones 1 y 3 ya mencionadas.

Las Figuras 50 y 51 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.27. *Quercus segoviensis*.

Vulnerable; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se concentra en las regiones del Soconusco, los Altos de Chiapas y la región Costa del Pacífico. La proyección 1 muestra una disminución significativa en el grado de idoneidad ambiental en las áreas actuales del nicho y aparecen áreas con mayor grado de idoneidad en la Faja Volcánica Trans Mexicana y la Sierra Madre del Sur, de igual manera, la proyección 2 cuenta con la misma distribución del nicho ecológico para el periodo actual, pero con una menor reducción del grado de idoneidad ambiental que la proyección 1; La proyección 3 también muestra una reducción del grado de idoneidad en las áreas del nicho ecológico actual y además, muestra nuevas áreas con idoneidad ambiental en el suroeste de la Sierra Madre Oriental, el este de la Faja Volcánica Trans Mexicana, en la Sierra de Juárez, y en el este de la Sierra Madre del Sur. La proyección 4 muestra la misma distribución que la proyección 3 pero con áreas de menor tamaño.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: los resultados para la especie muestran áreas estables en el Soconusco, los Altos de Chiapas, el oeste del estado de Michoacán, el sur de Oaxaca y el oeste de Chiapas en la región de la Costa del Pacífico y finalmente las áreas potenciales se encontraron en la Sierra Madre Oriental, el sureste del Altiplano Sur, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez y la Sierra Madre del Sur.

RCP 8.5: para esta especie podemos encontrar áreas estables en los altos de Chiapas, el Soconusco, el oeste de los Altos de Chiapas y el suroeste del estado Michoacán; por último, las áreas potenciales se identificaron en la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez y la Sierra Madre del Sur.

Las Figuras 52 y 53 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.2.28. *Quercus subspathulata*

Vulnerable; Endémica, Distribución media (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie se ubica en el oeste de la Sierra Madre Occidental y de la Faja Volcánica Trans Mexicana, así como una pequeña área en la región Costa del Pacífico ubicada en el estado de Nayarit. Los resultados de las proyecciones 1, 3 y 4 sugieren que la distribución actual del nicho se mantiene y aparecen nuevas áreas con idoneidad ambiental para su establecimiento en el sur de la Sierra Madre Occidental, la Sierra de Juárez en Oaxaca y el este de la Sierra Madre del Sur. Por último, la proyección 2 muestra idoneidad ambiental únicamente en el oeste de la Sierra Madre Occidental, el sur de la Sierra Madre Oriental y en menor medida en la Sierra de Juárez y la Sierra Madre del Sur.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: para esta especie se identificaron áreas estables en el oeste de la Sierra Madre Occidental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, y el suroeste del estado de Nayarit en la región Costa del Pacífico; en cuanto a las áreas potenciales, se encontraron en el centro de la Sierra

Madre Occidental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre oriental, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y los Altos de Chiapas.

RCP 8.5: las áreas estables encontradas para las proyecciones 2 y 4, se identificaron en las mismas regiones ya mencionadas para proyecciones 1 y 3, mientras que para las áreas potenciales sí se presentaron cambios, ubicándose en el centro de la Sierra Madre Occidental, el sur de la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra de Juárez, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco y los Altos de Chiapas.

Las Figuras 54 y 55 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

Sección *Protobalanus*

6.2.29. *Quercus cedrosensis*

Vulnerable; Microendémica; Distribución restringida (IUCN, 2003; Valencia-A, 2004).

Descripción individual de los modelos

La distribución actual del nicho ecológico de la especie está limitada a la región de Baja California, sobre todo en las Islas Cedros y Guadalupe. En la proyección 1, la distribución del nicho ecológico aumenta, tanto en el grado de idoneidad como en tamaño, y surge una nueva área con idoneidad ambiental en el noreste de la Faja Volcánica Trans Mexicana y sureste del Altiplano Sur, mientras que bajo el escenario 2, la idoneidad ambiental se concentra en el norte de Baja California y la Isla Guadalupe, y aparece una pequeña área en el Altiplano Sur. En las proyecciones 3 y 4 la idoneidad ambiental en las áreas de distribución actual del nicho prácticamente desaparece con excepción de la Isla Guadalupe, mientras que las áreas con mayor grado de idoneidad ambiental se ubican en el centro y noreste del Altiplano Sur para la proyección 3 y en el noreste de este para la proyección 4. Cabe mencionar que en las proyecciones del modelo de circulación MPI-ESM-LR (3 y 4) las áreas de idoneidad ambiental para la especie disminuyen de manera drástica mientras que con el modelo MIROC5 (proyecciones 1 y 2) el tamaño de las áreas se mantiene e incluso aumenta en algunas zonas.

Descripción compilada de los modelos

RCP 4.5: las áreas estables para esta especie fueron identificadas únicamente en el centro y este de la Isla Cedros perteneciente a la región de Baja California, y en el norte de Baja California Norte; en cuanto a las áreas potenciales, se encontró solo un área en el oeste de la misma Isla.

RCP 8.5: únicamente se pudo observar un área estable en la Isla Cedros, de igual manera, las áreas potenciales se encontraron en la misma Isla, más específicamente en el este y noreste de la misma.

Las Figuras 56 y 57 ubicadas en el apartado de Anexos representan los modelos de distribución del nicho ecológico actual y a futuro, y los modelos multibandas comparativos

para las proyecciones analizadas, respectivamente. De igual forma, la clave para cada una de las figuras puede ser consultada en la Tabla A1 del mismo apartado.

6.3. Patrones de distribución para las especies amenazadas de encinos en México

6.3.1. Presente

De acuerdo con los resultados obtenidos en el mapa acumulativo de la distribución actual del nicho ecológico de las 28 especies analizadas para este proyecto (Figura 3), se observó que las regiones biogeográficas con mayor presencia de encinos amenazados en México son: la Sierra Madre Oriental, principalmente en el sur de ésta, los Altos de Chiapas, la Sierra Madre del Sur, el Soconusco, la Sierra de Juárez y con áreas más pequeñas la Faja Volcánica Trans Mexicana, el este de la Costa del Pacífico, el Altiplano Sur.

De igual forma se identificaron las Áreas naturales Protegidas que comparten territorio con la distribución actual del nicho ecológico de los encinos amenazados, y se encontraron un total de 101 ANP que comparten el 11% del área total del nicho ecológico acumulado de las especies de encinos, de las cuales 41 corresponden a Parques Nacionales, 27 son Reservas de la Biósfera, 22 son Áreas de Protección de la Flora y Fauna, 7 son Áreas para la Protección de los Recursos Naturales y 4 son Monumentos Naturales.

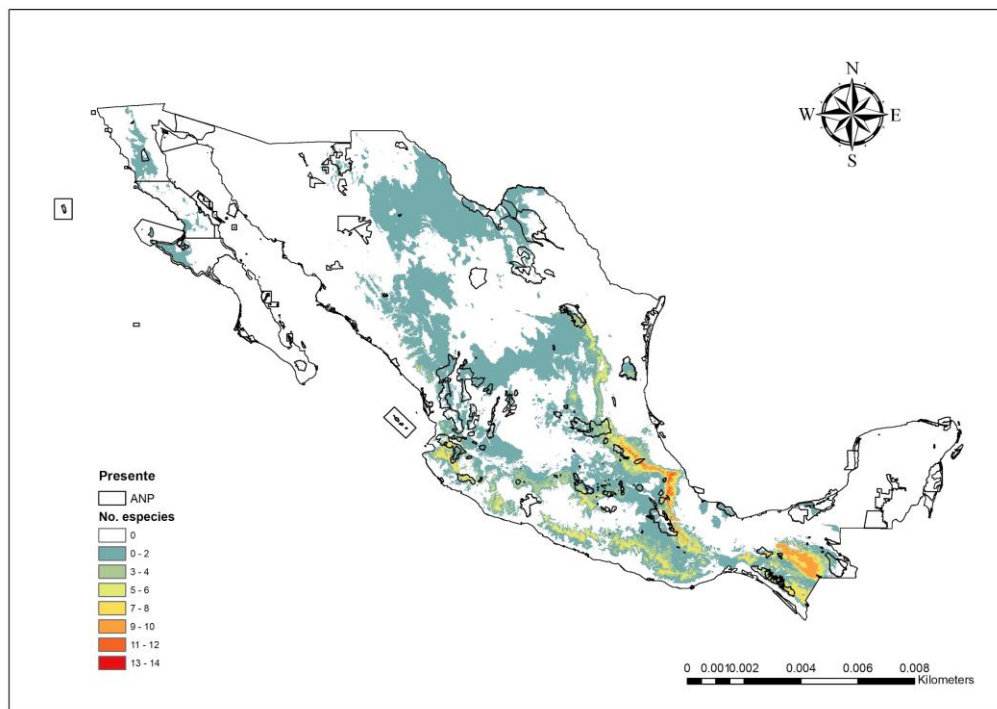


Fig. 3. Distribución potencial acumulada de las 28 especies amenazadas del género *Quercus* y Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos corresponden a las ANP y las áreas coloreadas a la distribución de los encinos, conforme la intensidad del color aumenta, el número de especies de encino es mayor.

6.3.2. MIROC5 RCP 4.5

De acuerdo con los resultados observados en el mapa acumulativo de la distribución de las 28 especies analizadas bajo la proyección MIROC5 con el escenario RCP 4.5 para el año 2080 (Figura 4), se identificó que las regiones biogeográficas con mayor presencia de encinos amenazados en México bajo dichas condiciones son: la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Oriental principalmente el sur, la Sierra de Juárez, los Altos de Chiapas, el Soconusco y en menor medida la Sierra Madre Occidental, el este de la Costa del Pacífico y el Altiplano Sur. También se identificaron 107 ANP que comparten el 8% del territorio total donde se estima que los encinos pueden permanecer o establecerse bajo las condiciones impuestas por el escenario MIROC5 RCP 4.5; de las 107 ANP encontradas, 46 están catalogadas como Parques Nacionales, 27 Áreas para la Protección de la Flora y Fauna, 24 son Reservas de la Biósfera, 7 son Áreas para la Protección de Recursos Naturales, 2 son Monumentos Naturales y uno es un Santuario de Flora y Fauna.

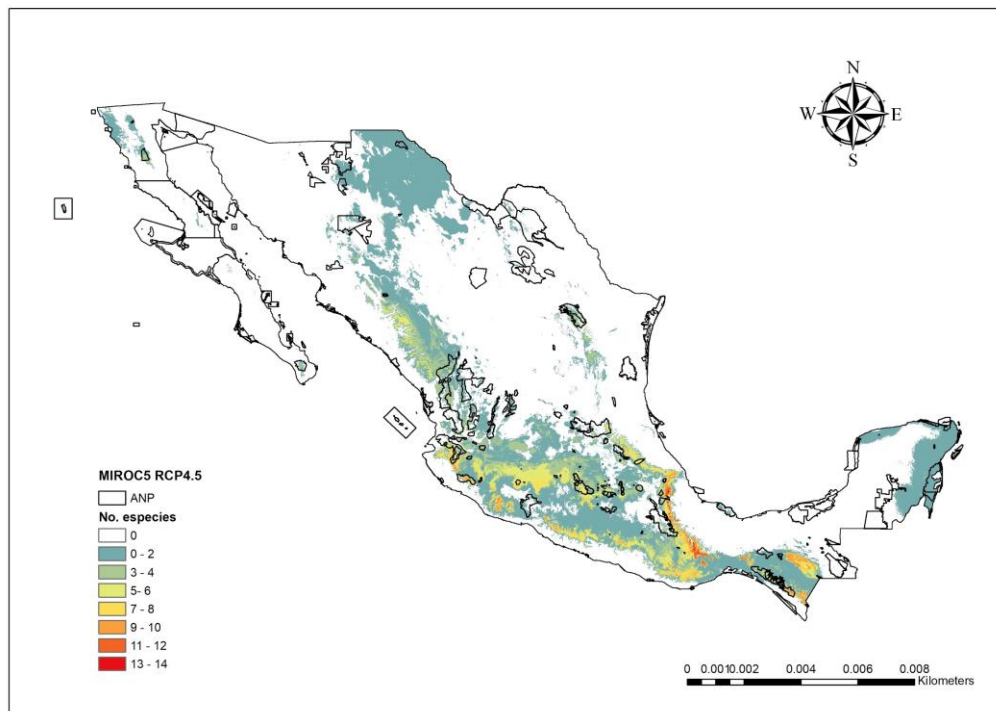


Fig. 4. Distribución potencial acumulada de las 28 especies amenazadas del género *Quercus* bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080, y Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos corresponden a las ANP y las áreas coloreadas a la distribución de los encinos, conforme la intensidad del color aumenta, el número de especies de encino es mayor.

6.3.3. MIROC5 RCP 8.5

De acuerdo con los resultados obtenidos por el mapa acumulativo de la distribución de las 28 especies analizadas bajo la proyección MIROC5 con el RCP 8.5 para el año 2080 (Figura 5), se obtuvo que las regiones biogeográficas con mayor presencia de encinos amenazados en México bajo dichas condiciones son: la Sierra Madre del Sur, la Faja Volcánica Trans Mexicana, los Altos de Chiapas, la Sierra Madre Oriental, el Soconusco, la Sierra de Juárez,

y con un menor tamaño de áreas el Altiplano Sur, y el este de la Costa del Pacífico. También se identificaron 96 ANP que comparten el 10% del territorio total donde se estima que los encinos pueden permanecer o establecerse bajo las condiciones impuestas por el escenario MIROC5 RCP 8.5; de las 96 ANP encontradas, 41 están catalogadas como Parques Nacionales, 24 son Reservas de la Biósfera, 10 Áreas para la Protección de la Flora y Fauna, 7 Áreas para la Protección de Recursos Naturales, un Monumento Natural y un Santuario de Flora y Fauna.

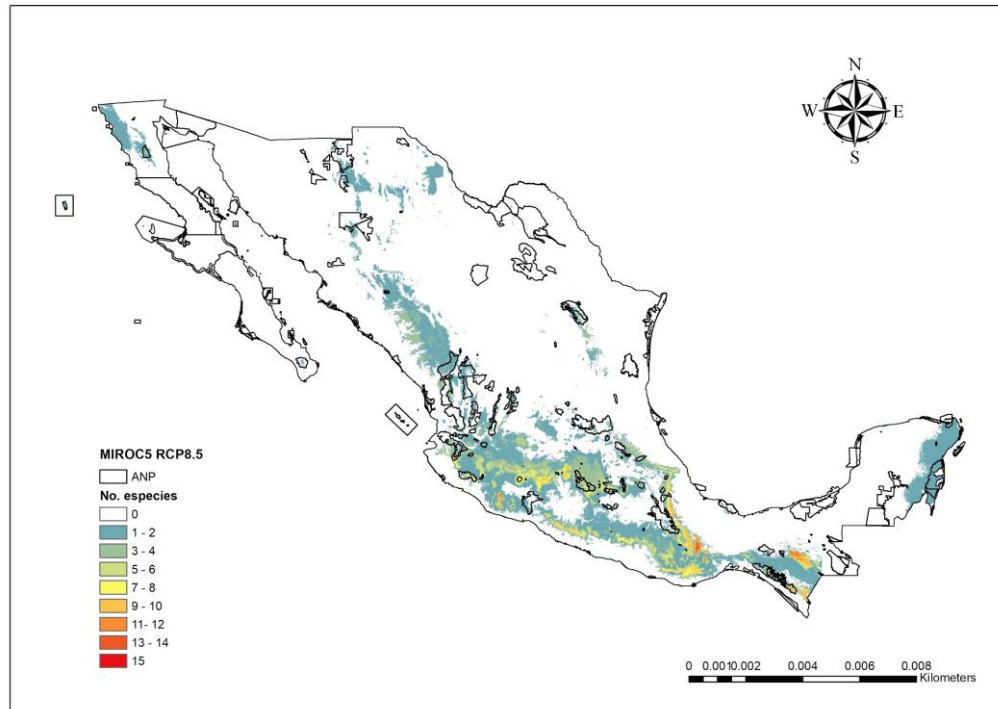


Fig. 5. Distribución potencial acumulada de las 28 especies amenazadas del género *Quercus* bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080, y Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos corresponden a las ANP y las áreas coloreadas a la distribución de los encinos, conforme la intensidad del color aumenta, el número de especies de encino es mayor.

6.3.4. MPI-ESM-LR RCP 4.5

De acuerdo con los resultados observados en el mapa acumulativo de la distribución del nicho ecológico de las 28 especies analizadas bajo la proyección MPI-ESM-LR con el RCP 4.5 para el año 2080 (Figura 6), se obtuvo que las regiones biogeográficas con mayor presencia de encinos amenazados en México bajo dichas condiciones son: la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre del Sur, los Altos de Chiapas, el Soconusco, la Sierra Madre Oriental, la Sierra de Juárez, y en menor medida el este de la Sierra Madre Occidental, el sureste del Altiplano Sur y el este de la Costa del Pacífico. También se identificaron 118 ANP que comparten el 9% del territorio total donde se estima que los encinos pueden permanecer o establecerse bajo las condiciones impuestas por el escenario MPI-ESM-LR RCP 4.5; de las 118 ANP encontradas, 48 están catalogadas como Parques Nacionales, 31 Áreas para la Protección de la Flora y Fauna, 28 son Reservas de la Biósfera, 8 Áreas para la

Protección de Recursos Naturales, 2 son Monumentos Naturales y un Santuario de Flora y Fauna.

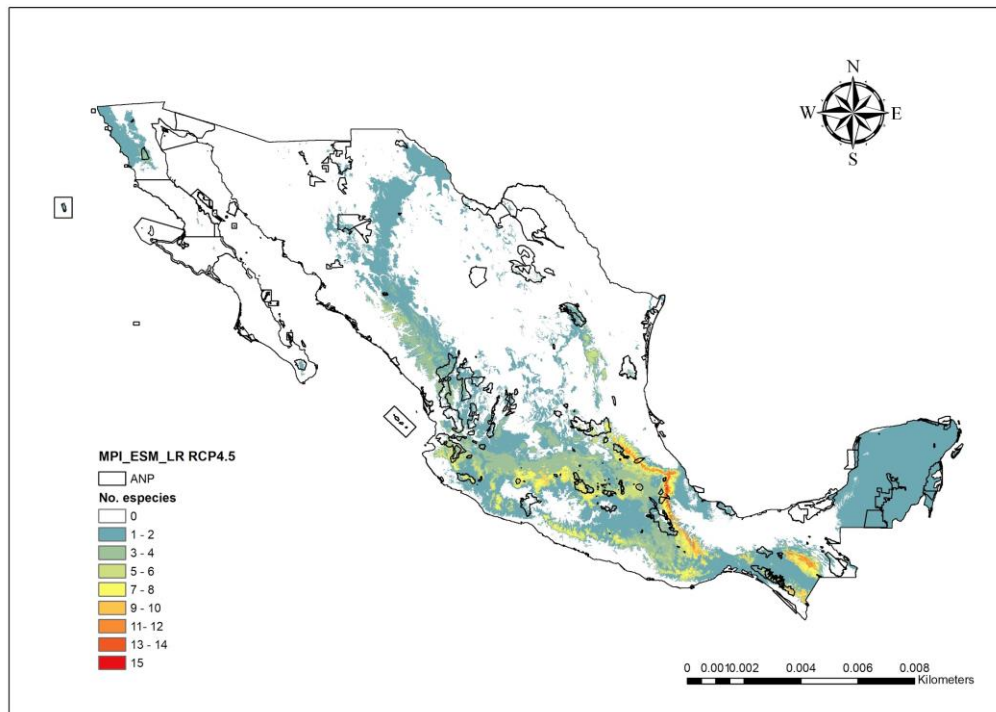


Fig. 6. Distribución potencial acumulada de las 28 especies amenazadas del género *Quercus* bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080, y Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos corresponden a las ANP y las áreas coloreadas a la distribución de los encinos, conforme la intensidad del color aumenta, el número de especies de encino es mayor.

6.3.5. MPI-ESM-LR RCP 8.5

De acuerdo con los resultados observados en el mapa acumulativo de la distribución del nicho ecológico de las 28 especies analizadas bajo la proyección MPI-ESM-LR con el RCP 8.5 para el año 2080 (Figura 7), se obtuvo que las regiones biogeográficas con mayor presencia de encinos amenazados en México bajo dichas condiciones son: la Faja Volcánica Trans Mexicana, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Madre Oriental, los Altos de Chiapas, la Sierra de Juárez, el Soconusco y en menor medida el Altiplano Sur y el este de la Costa del Pacífico. También se identificaron 99 ANP que comparten el 9% del territorio total donde se estima que los encinos pueden permanecer o establecerse bajo las condiciones impuestas por el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5; de las 99 ANP encontradas, 41 están catalogadas como Parques Nacionales, 26 son Reservas de la Biósfera, 23 Áreas para la Protección de la Flora y Fauna, 7 Áreas para la Protección de Recursos Naturales y 2 Monumentos Naturales.

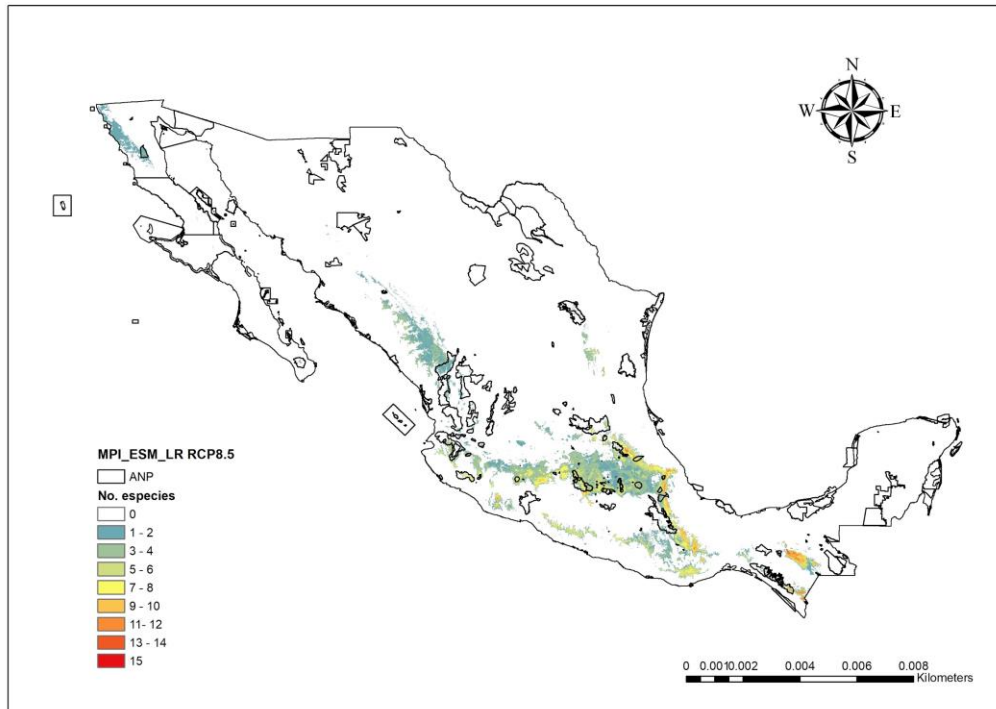


Fig. 7. Distribución potencial acumulada de las 28 especies amenazadas del género *Quercus* bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080, y Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos corresponden a las ANP y las áreas coloreadas a la distribución de los encinos, conforme la intensidad del color aumenta, el número de especies de encino es mayor.

6.4. Papel de las estrategias de conservación *in situ* y *ex situ* en la conservación de las especies amenazadas de encinos en México

Para el nicho ecológico actual acumulado de los encinos amenazados de México se encontró que solamente el 10.8% de la distribución acumulada de las especies analizadas se encuentran dentro de alguna categoría de ANP, de las cuáles las Reservas de la Biósfera (RB) y las Áreas para la Protección de los Recursos Naturales (APRN) son las que cuentan con una mayor extensión de territorio con 25 915 y 11 450 km² respectivamente; para las proyecciones a futuro el porcentaje representado del nicho ecológico en las ANP se redujo hasta un 2% para los escenarios RCP 4.5 y hasta un 4% para los escenarios RCP 8.5 (Fig. 8); las categorías de RB y APRN se mantuvieron en las 4 proyecciones como aquellas con mayor superficie ocupada.

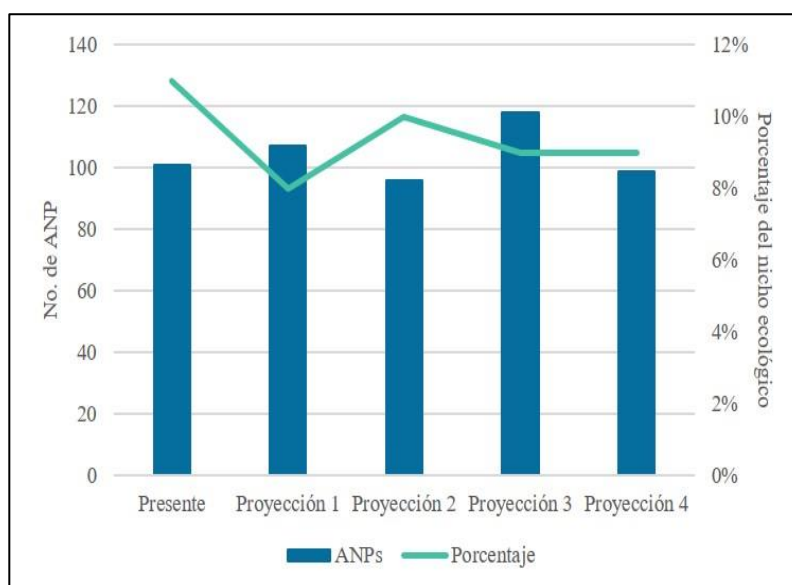
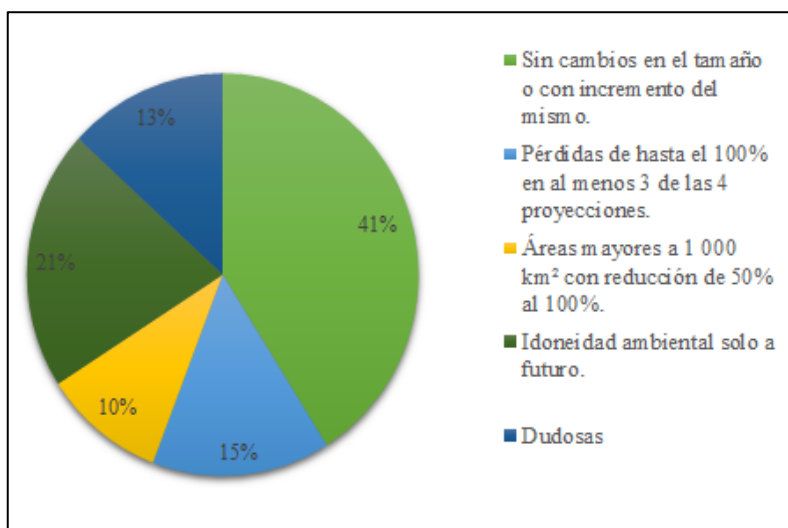


Fig. 8. Número de Áreas Naturales Protegidas con idoneidad ambiental para el establecimiento de encinos amenazados en el presente y bajo escenarios de cambio climático para el 2080 vs el porcentaje del nicho ecológico dentro de alguna categoría de ANP bajo escenarios de cambio climático con respecto al porcentaje actual. Donde: la Proyección 1 corresponde a MIROC5 RCP 4.5; la Proyección 2 corresponde a MIROC5 RCP 8.5; la Proyección 3 a MPI-ESM-LR RCP 4.5; y la Proyección 4 a MPI-ESM-LR RCP 8.5.

Se identificó un total de 129 ANP con áreas idóneas para el establecimiento de uno o más encinos, ya sea para el periodo actual o para las proyecciones a futuro. Entre las 129 se encontraron 53 áreas naturales protegidas con resultados positivos para el año 2080, donde la superficie de idoneidad ambiental para el establecimiento de encinos se mantuvo o incrementó su tamaño; se encontraron 19 ANP con pérdidas de hasta el 100% del área actual con idoneidad ambiental para al menos 3 de las 4 proyecciones analizadas, si bien las superficies con idoneidad ambiental dentro de las mismas varían desde los 0.2 hasta los 4900 km². Para las áreas con mayor superficie de idoneidad ambiental (>1000 km²) en la actualidad, los resultados mostraron que 13 ANP se verán afectadas en al menos 3 de las 4 proyecciones a futuro con una reducción desde el 50% hasta el 100%. Finalmente, se identificaron 27 ANP que solo cuentan con idoneidad ambiental para las proyecciones a futuro (Fig. 9).

Fig. 9. Resultados observados en los tamaños de las áreas de idoneidad dentro de 129 Áreas Naturales Protegidas bajo escenarios de cambio climático con respecto al presente.



Posteriormente, como resultado del mismo análisis de representatividad, pero con respecto a los centros de diversidad de encinos, se encontraron 50 ANP con idoneidad ambiental para el establecimiento de 5 o más encinos (Figura 10), de las cuales 19 no mostraron idoneidad en la actualidad, es decir, que solo representan un hábitat para los encinos bajo alguna de las proyecciones a futuro (Figuras 10-14).

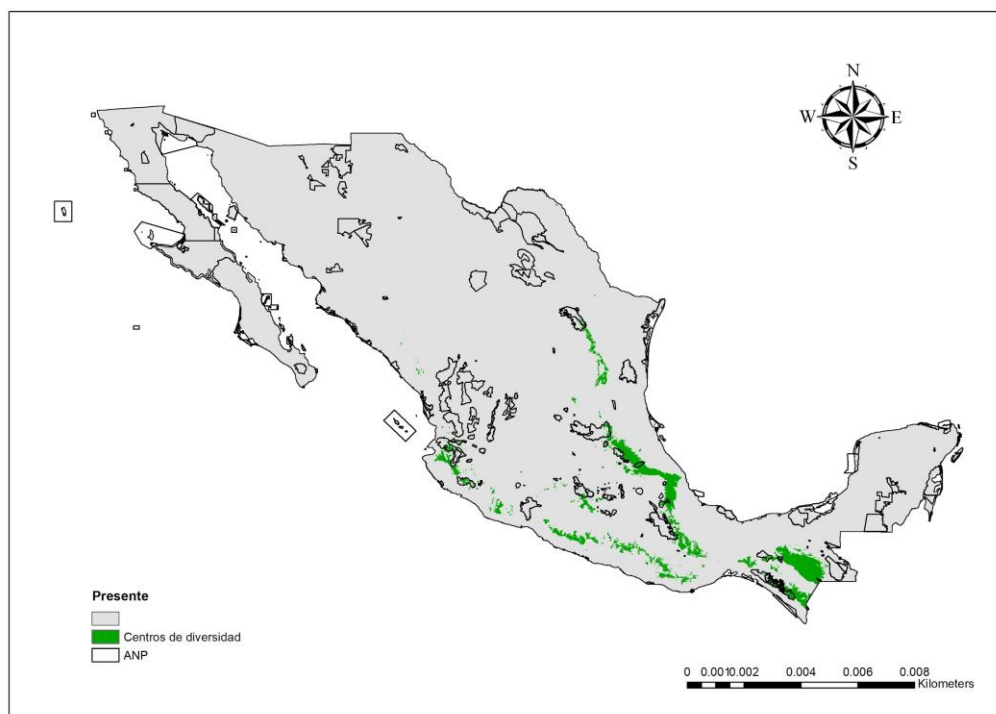


Fig. 10. Centros de diversidad actuales de encinos amenazados (áreas en verde) y Áreas Naturales Protegidas (polígonos).

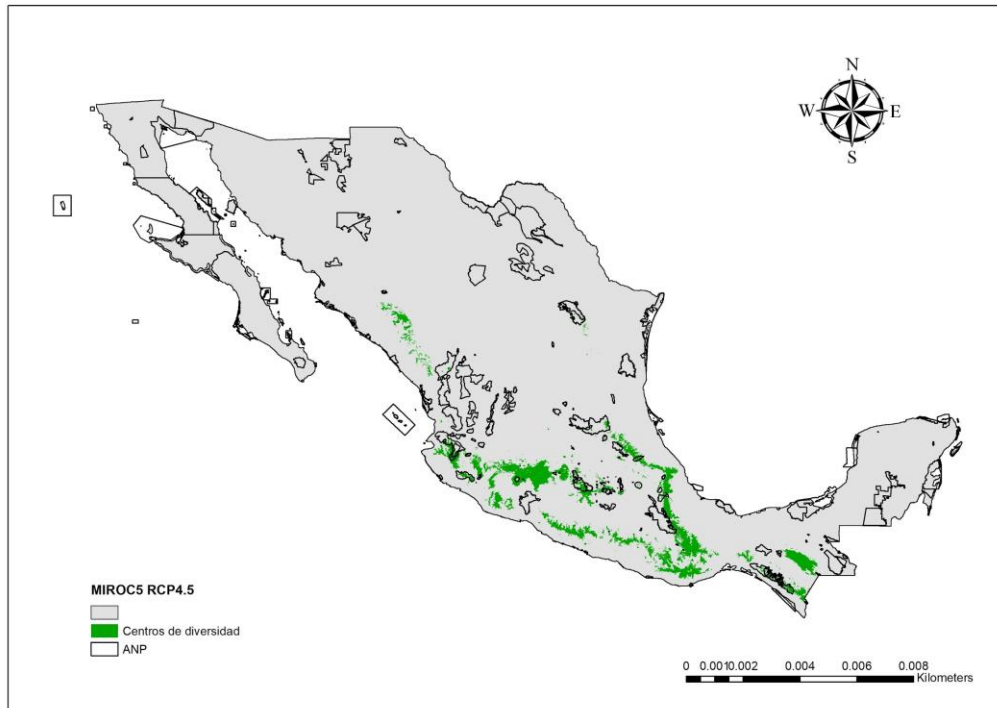


Fig. 11. Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 (áreas en verde), y Áreas Naturales Protegidas (polígonos).

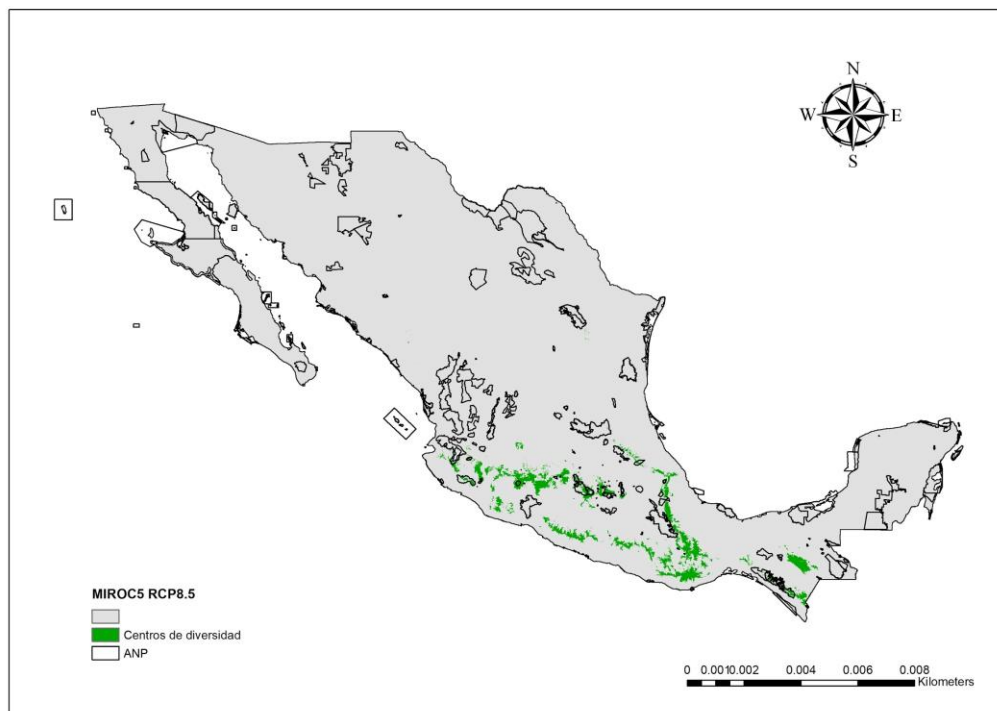


Fig. 12. Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 (áreas en verde), y Áreas Naturales Protegidas (polígonos).

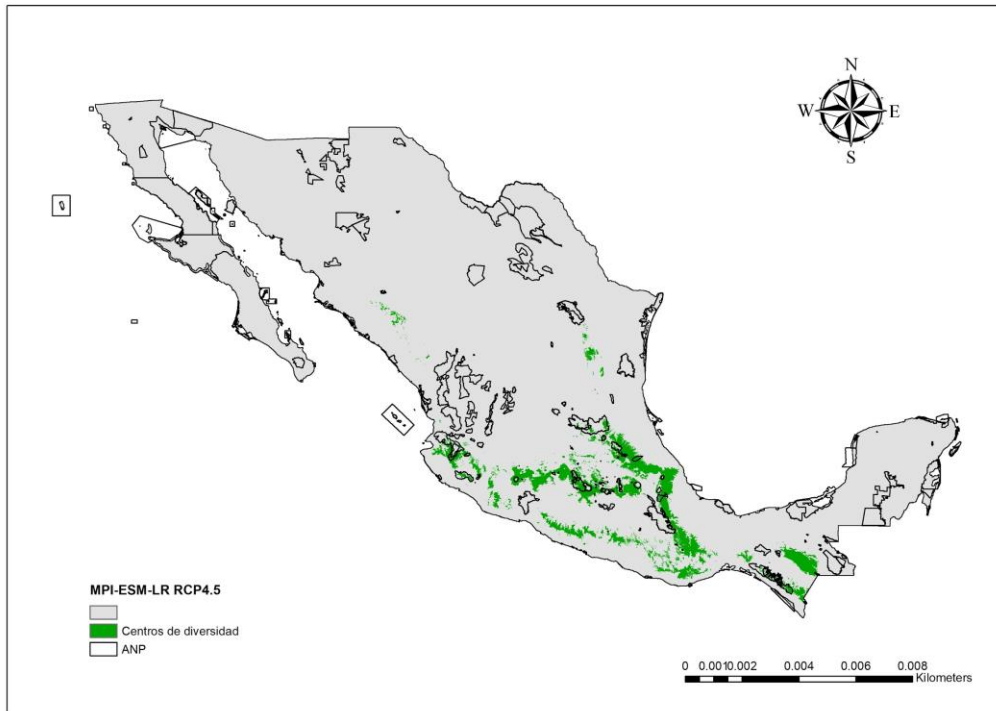


Fig. 13. Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 (áreas en verde), y Áreas Naturales Protegidas (polígonos).

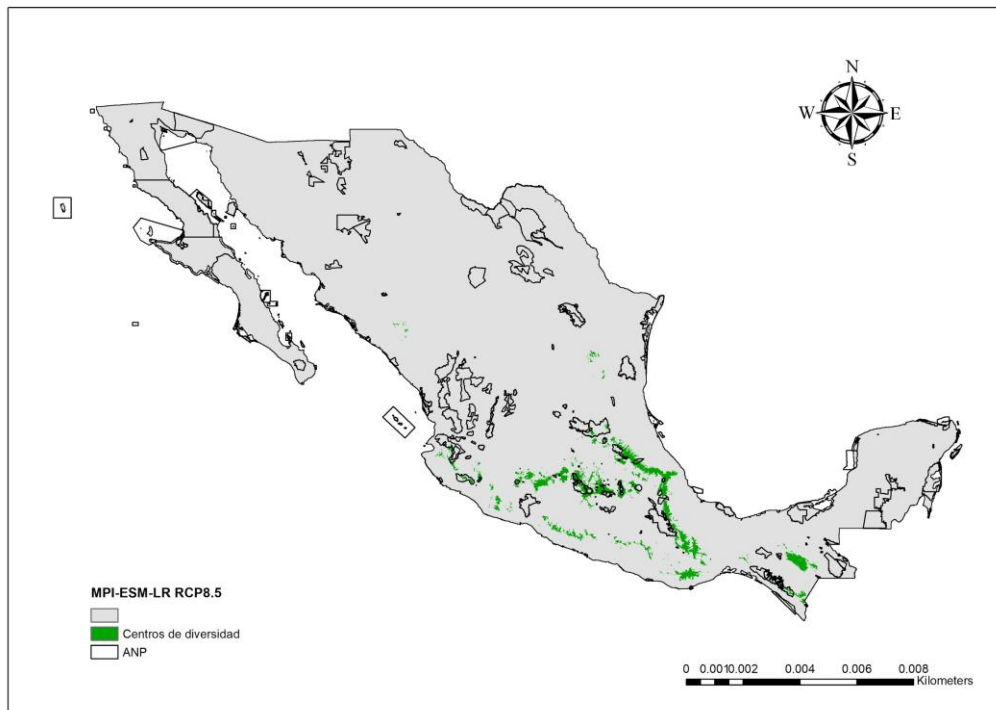


Fig. 14. Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 (áreas en verde), y Áreas Naturales Protegidas (polígonos).

Finalmente se identificaron 6 áreas naturales protegidas con resultados optimistas (menor pérdida de territorio o incluso ganancia del mismo) tanto para los centros de diversidad de encinos como para la distribución general del nicho ecológico acumulado de los mismos, éstas áreas naturales protegidas son: Reserva de la Biosfera “Tehuacán-Cuicatlán”, Reserva de la Biósfera “Volcán Tacaná”, APRN “Z.P.F.V la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa”, APRN “Z.P.F.T.C.C. de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec”, APFF “Corredor Biológico Chichinautzin” y el Parque Nacional “Cerro de Garnica. Las Tablas 1 y 2 ubicadas en el apartado de Anexos representan los resultados recién descritos para cada una de las Áreas Naturales Protegidas.

De los 56 Jardines Botánicos en México identificados por Botanic Gardens Conservation International (www.bgci.org), identificamos que 14 instituciones representan un alto potencial para la conservación de los encinos amenazados en el país. Dicho potencial se define por su proximidad con uno o más centros de diversidad de encinos y por su concurrencia en más de una proyección a futuro (Tabla 4). Cabe mencionar que su importancia se evaluó en función de su ubicación dentro de las regiones biogeográficas, dado que a pesar de que existen otros jardines fuera de las regiones con una mayor cercanía, la mayoría de los jardines tienden a ser de carácter regional y por lo tanto existe una mayor probabilidad de que incluyan en sus colecciones algunas de las plantas nativas a dichas regiones y así apoyar a los esfuerzos por conservar a los encinos en México (Figura 15-19).

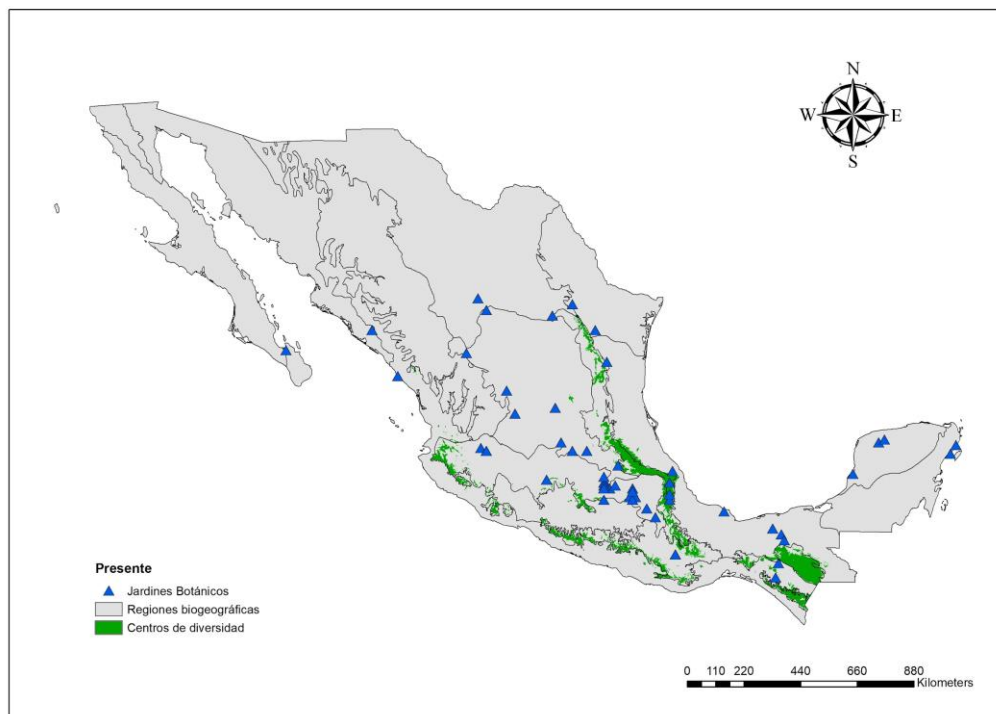


Fig. 15. Ubicación de los Jardines Botánicos con respecto a los Centros de diversidad actuales de encinos amenazados, bajo la regionalización biogeográfica del área de estudio.

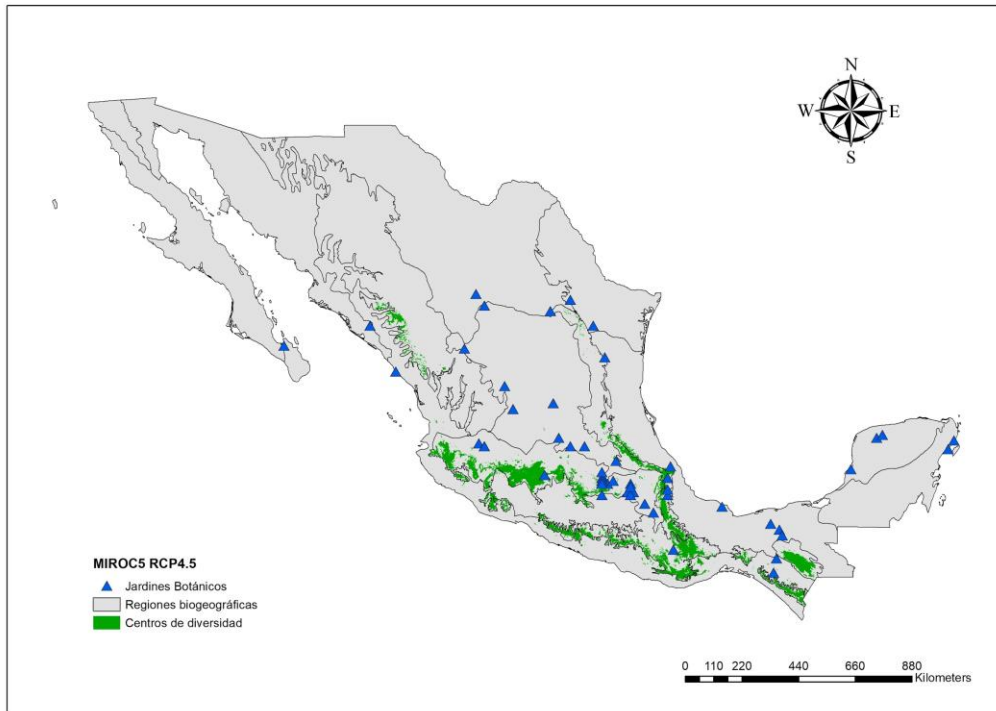


Fig. 16. Ubicación de los Jardines Botánicos con respecto a los Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5, bajo la regionalización biogeográfica del área de estudio.

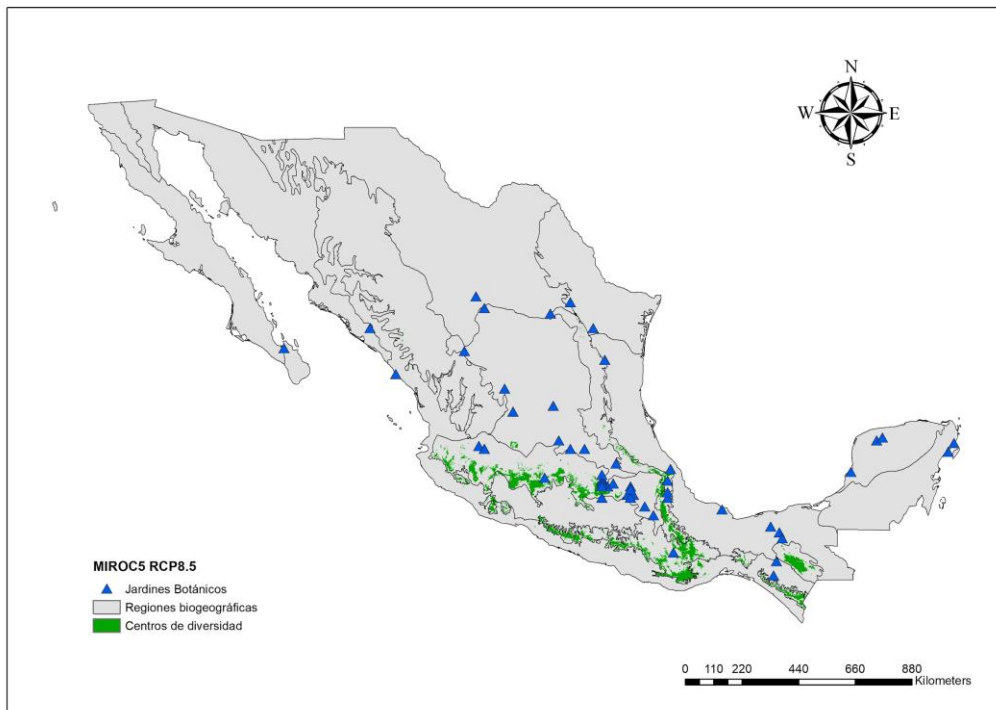


Fig. 17. Ubicación de los Jardines Botánicos con respecto a los Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5, bajo la regionalización biogeográfica del área de estudio.

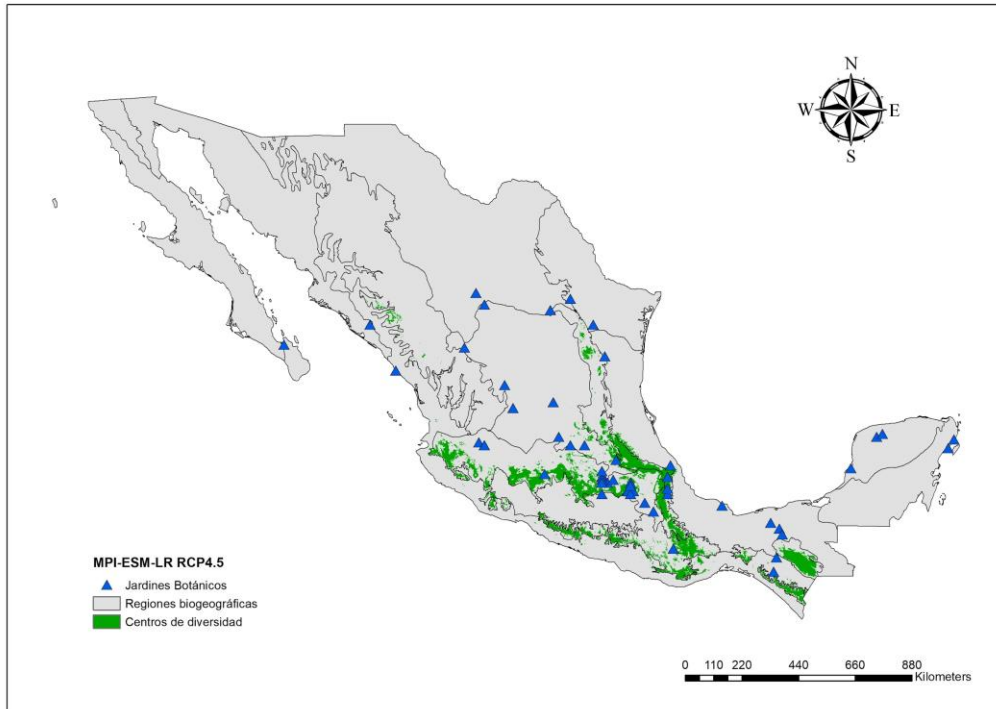


Fig. 18. Ubicación de los Jardines Botánicos con respecto a los Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5, bajo la regionalización biogeográfica del área de estudio.

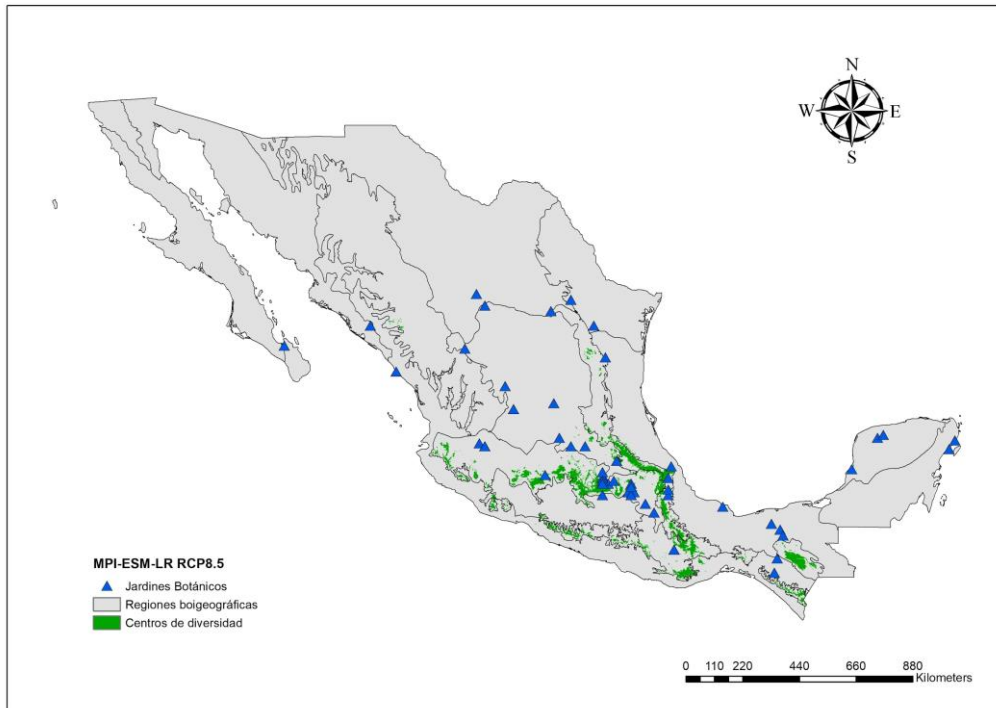


Fig. 19. Ubicación de los Jardines Botánicos con respecto a los Centros de diversidad de encinos amenazados bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5, bajo la regionalización biogeográfica del área de estudio.

A continuación, se muestran los Jardines Botánicos seleccionados como importantes para cada región biogeográfica (con excepción de las regiones Sierra Madre Occidental, Soconusco y Los Altos de Chiapas por no contar con ningún Jardín Botánico dentro de su territorio), además de una pequeña descripción de estos. Cabe mencionar que no se cuenta con una descripción para todos los jardines botánicos mencionados en la Tabla 4, dado que en las fuentes digitales utilizadas no presentan información oficial ni detallada de todos ellos.

Tabla 4. Categorización por proximidad de los Jardines Botánicos a uno o más Centro de Diversidad de encinos amenazados, donde 1=0-100km, 2=101-200km, 3=201-300km, 4=301-400km y 5=401-550km.

Jardín Botánico	Presente		Proyección 1		Proyección 2		Proyección 3		Proyección 4	
	Categoría		Categoría		Categoría		Categoría		Categoría	
Altiplano Sur										
Regional de Cadereyta “Ing. Manuel González de Cosío”			2				1	2		1
De Cante	3				3		3	2		
“Ollintpetl”			1						1	1
Costa del Pacífico										
De la Facultad de Ciencias Agronómicas, UNACH.	1	2	2	5	5		5		5	
“Dr. Faustino Miranda”	1	1	2	5	5		5			
Faja Volcánica Trans Mexicana										
“Francisco Peláez”			1		1		1		1	
Centro de Desarrollo Tecnológico Morelia		1	1		1				1	
Ignacio Rodríguez Alconedo			1		1		1			
Sierra de Juárez (Oaxaca)										
Toxpan	1		1		1		1		2	

Sierra Madre del Sur											
“Santo Domingo”	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Regional “Cassiano Conzantti”	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Sierra Madre Oriental											
“Francisco Javier Clavijero”	4	3	4	5	1	1	1	1	2	5	5
Centro Regional Universitario Oriente	1	5	5	1	1	1	1	1	3	5	5
“Ing. Gustavo Aguirre Benavides”	2	3	1	1	1	1	1	3	3	1	1

6.4.1. Jardines Botánicos del Altiplano Sur

- *Jardín Botánico Regional de Cadereyta “Ing. Manuel González de Cosío”* ubicado en el estado de Querétaro, este jardín se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en 3 de las 4 proyecciones a futuro, por lo que su papel en la conservación de los mismos podría resultar primordial, cuenta con una superficie de 9 ha, de las cuales 3 están destinadas a un arboretum con especies nativas, el objetivo general del jardín es resguardar y conservar la vegetación del semidesierto queretano.
- *Jardín Botánico de Cante* también conocido como El Charco del Ingenio, ubicado en el municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato, dentro del Área Natural protegida que lleva el mismo nombre, dicho jardín cuenta con una extensión de 67 ha, y se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encino amenazados en 2 de las 4 proyecciones a futuro; en este jardín se pueden encontrar ejemplares en su mayoría de la familia Cactaceae, Crassulaceae, Bromeliaceae y Agavaceae, cabe mencionar que este jardín participa arduamente en la conservación y rescate de especies bajo categorías de riesgo mediante su resguardo y propagación de las mismas, actualmente se encuentran en la búsqueda por ampliar sus esfuerzos hacia la vegetación a nivel regional.
- *Jardín Botánico “Ollintpetl”* ubicado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, dentro del Parque Ecológico Cubitos con una superficie de 132 ha divididas en 3 zonas, las dos primeras corresponden a la reserva ecológica y en la tercera se ubica el jardín botánico, donde se encuentran principalmente cactáceas y suculentas de las regiones semiáridas del Valle de México, el Mezquital, Metztitlán y Moctezuma; este jardín encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en 2 de las 4 proyecciones a futuro.

6.4.2. Jardines Botánicos de la Costa del Pacífico

- *Jardín Botánico “Dr. Faustino Miranda”* ubicado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en el estado de Chiapas con una superficie de 4.4 ha, se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en 3 de las 4 proyecciones a futuro y en la actualidad alberga en un 98% a las especies vegetales de Chiapas.

6.4.3. Jardines Botánicos de la Faja Volcánica Trans Mexicana

- *Jardín Etnobotánico “Francisco Peláez”* se ubica en el municipio de San Andrés Cholula, Puebla y cuenta con una extensión de 5500 m² y se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en las 4 proyecciones a futuro realizadas, en la actualidad alberga más de 1200 plantas de distintas especies con el objetivo principal de preservar los conocimientos etnobotánicos sobre los usos de las plantas nativas y no nativas de la región.
- *Jardín Botánico Ignacio Rodríguez Alconedo* también conocido como Jardín Botánico Universitario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, cuenta con una extensión de 10.7 ha de las cuales 5 ha están dedicadas al arboretum y se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en 3 de las 4 proyecciones a futuro; actualmente alberga un aproximado de 14 069 ejemplares entre los que se encuentran especies nativas y más de 330 especies representativas de la región y de los que destacan las colecciones de *Pinus*, *Quercus*, *Cornus* y *Jatropha*, puesto que en este jardín se encuentra la colección nacional de *Quercus* que lleva por nombre Quercetum.

6.4.4. Jardines Botánicos de la Sierra Madre del Sur

- *Jardín Botánico “Santo Domingo”* mejor conocido como Jardín Etnobotánico de Oaxaca, se ubica en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca dentro del Centro Cultural Santo Domingo cuenta con un total de 2.32 ha de superficie y se encuentra presente en las 4 proyecciones a futuro realizadas, si bien este jardín no se encuentra en las cercanías, sí es uno de los que cuentan con mayor proximidad a los centros dentro de la región ya que solo se cuentan con 3 jardines dentro de la misma. Actualmente alberga 950 especies que corresponden a 118 familias botánicas, llevando a cabo un gran esfuerzo por representar la diversidad de ecosistemas y cultural del estado.
- *Jardín Botánico “Cassiano Conzatti”* se ubica en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca, con una superficie de 3 ha y al igual que el Jardín Botánico “Santo Domingo”, no es el jardín más cercano, pero sí uno de los más próximos a los centros de diversidad de encinos amenazados en la región de la Sierra Madre del Sur, además de ser uno de los 2 únicos jardines de la región, por lo cual se encuentra presente en las 4 proyecciones a futuro analizadas. En la actualidad el jardín botánico “Cassiano Conzatti” está dedicado a mantener colecciones de plantas nativas de la región del Valle de Oaxaca y sus alrededores, las colecciones principales están dedicadas a la conservación de cactáceas y suculentas además de algunas plantas de interés económico y plantas acuáticas, cuenta con un total de 28304 ejemplares de plantas vasculares de las cuales 20055 fueron colectadas en el estado de Oaxaca.

6.4.5. Jardines Botánicos de la Sierra Madre Oriental

- *Jardín Botánico “Francisco Javier Clavijero”* ubicado en la ciudad de Xalapa, Veracruz, con una extensión aproximada de 7.5 ha, de las cuáles 1.5 ha están dedicadas al

bosque mesófilo de montaña y se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados de las 4 proyecciones a futuro analizadas; este jardín botánico tiene como línea de investigación principal las colecciones nacionales de cycadas y bambúes, colecciones de plantas medicinales de la región y la propagación de especies amenazadas procedentes de los bosques mesófilos.

- *Jardín Botánico “Ing. Gustavo Aguirre Benavides”* ubicado en la ciudad de Saltillo, Coahuila, cuenta con una superficie de 4 ha y se encuentra presente en las cercanías de los centros de diversidad de encinos amenazados en 1 de las 4 proyecciones a futuro analizadas; tiene como objetivo conservar la vegetación de la zona árida del desierto chihuahuense con un énfasis en la familia Cactaceae del estado de Coahuila por considerarse con alta vulnerabilidad a la extinción.

6.5. Evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo cambio climático observados.

Se observó que 7 de las 13 especies catalogadas en peligro crítico (CR) muestran un alto riesgo de extinción al perder más del 70% de su distribución potencial actual bajo al menos tres de los cuatro escenarios estudiados, mientras que las especies restantes resultaron más optimistas con valores de pérdida más bajos o incluso con aumentos significativos en su distribución a futuro, lo cual sugiere la posibilidad de re-evaluar su categoría de riesgo.

Mientras que, de las 15 especies catalogadas como vulnerables, siete (*Quercus cedrosensis*, *Q. crispipilis*, *Q. deliquescens*, *Q. devia*, *Q. elliptica*, *Q. galeanensis*, *Q. glabrescens*) presentarán una pérdida mayor al 80% de su distribución actual en al menos 2 de las cuatro proyecciones estudiadas, lo cual indica que la mayoría de ellas podrían subir de categoría como en peligro crítico dado su alto riesgo de extinción; mientras que solamente cinco especies cuentan con las características de pérdida para clasificarse como vulnerables (*Quercus acutifolia*, *Q. affinis*, *Q. calophylla*, *Q. hintoniorum*, *Q. sapotifolia*). Finalmente, las tres especies restantes muestran posibles ganancias en su distribución (*Quercus purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. subspathulata*), lo cual las dejaría fuera de esta clasificación de riesgo.

Cabe mencionar que recientemente la IUCN revaluó la categorización de las especies dentro de la “Red List”, 17 de las 28 especies analizadas bajaron de categoría, 10 se denominaron como en “Menor preocupación”, tres como “Datos deficientes” y cuatro desaparecieron de la lista (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentajes de pérdida/aumento en la distribución del nicho ecológico actual de las especies analizadas, bajo los 4 escenarios de cambio climático analizados, así como su cambio de clasificación en la “RedList”.

Especie	Porcentajes de pérdida/aumento (%)				Clasificación anterior	Clasificación actual
	P1	P2	P3	P4		
<i>Q. nixoniana</i>	-100	-100	-77	-100	Peligro Crítico	Sale de la lista
<i>Q. martinezii</i>	-97	-96	-98	-97	Peligro Crítico	Menor Preocupación
<i>Q. macdougalli</i>	-95	-98	-82	-97	Peligro Crítico	Vulnerable
<i>Q. acherdophylla</i>	492	841	1181	935	Peligro Crítico	Datos Deficientes
<i>Q. germana</i>	-73	-87	-56	-80	Peligro Crítico	Menor Preocupación
<i>Q. insignis</i>	-76	-82	-69	-88	Peligro Crítico	En peligro
<i>Q. hirtifolia</i>	16	-17	-79	-91	Peligro Crítico	En peligro
<i>Q. skinneri</i>	-54	-64	-28	-73	Peligro Crítico	Vulnerable
<i>Q. xalapensis</i>	-28	-73	-36	-64	Peligro Crítico	Menor Preocupación
<i>Q. uxoris</i>	210	128	200	64	Peligro Crítico	Menor Preocupación
<i>Q. pinnativenulosa</i>	555	427	427	294	Peligro Crítico	Sale de la lista
<i>Q. paxtalensis</i>	25	-32	65	-16	Peligro Crítico	Datos Deficientes

<i>Q. crispipilis</i>	153	67	966	170	Vulnerable	Sale de la lista
<i>Q. glabrescens</i>	-87	-90	-78	-94	Vulnerable	Menor Preocupación
<i>Q. elliptica</i>	-78	-85	-68	-86	Vulnerable	Menor Preocupación
<i>Q. deliquescens</i>	-48	-91	-68	-95	Vulnerable	Datos Deficientes
<i>Q. sapotifolia</i>	-75	-73	-64	-86	Vulnerable	Menor Preocupación
<i>Q. calophylla</i>	-55	-75	-45	-77	Vulnerable	Sale de la lista
<i>Q. affinis</i>	-8	-61	-27	-62	Vulnerable	Menor Preocupación
<i>Q. segoviensis</i>	420	250	260	118	Vulnerable	Menor Preocupación
<i>Q. subspathulata</i>	62	26	144	28	Vulnerable	Menor Preocupación

7. Discusión

Los encinos como especies dominantes en los ecosistemas, tienen una gran importancia en la estructura de los mismos (Kappelle, 2006, Pérez-Ramos, 2014), además como árboles leñosos representan una fuente de ingresos para miles de familias que hacen uso de su madera y sus frutos; dichos usos han desencadenado la pérdida de los bosques de encino (Luna et al, 2003, Gutiérrez R.P. y Bárcenas R., 2008), esto aunado a los fenómenos naturales provocados por un cambio climático acelerado, y al cambio de uso de suelo, han dado paso a la urgente necesidad de proteger y conservar a los encinos.

Por lo anterior, resulta fundamental la evaluación del estado de riesgo de los encinos en México y proponer planes de conservación y restauración efectivos; bajo esta premisa el presente estudio busca brindar información útil para planes de conservación y restauración de encinos en cuanto a los cambios esperados en la distribución del nicho ecológico de las especies amenazadas bajo escenarios de cambio climático para el año 2080, además de concientizar tanto a instituciones gubernamentales como a la población en general sobre la desinformación existente alrededor de la vulnerabilidad de especies amenazadas de encinos en México e incentivar planes de acción en todos los niveles.

7.1. Distribución de las especies amenazadas del género *Quercus* en México

Como ya se ha mencionado anteriormente, los encinos no cuentan con una distribución uniforme a través del territorio mexicano, se pueden encontrar en una amplia gama de ecosistemas como respuesta a las características ambientales del país y al lugar de origen de cada especie (Muller, 1942 en Zavala-Chávez, 1998), patrón que pudo observarse en el presente estudio. Los modelos de nicho ecológico obtenidos para las 28 especies analizadas en este estudio, concuerdan con lo observado en la distribución del género *Quercus* en México por Rzedowski (1978) en zonas montañosas y climas semihúmedos, principalmente en la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental, el Eje Volcánico, la Sierra Madre del Sur y en las sierras del norte de Oaxaca y Chiapas, así como en las montañas del Altiplano; donde el clima templado y semihúmedo permite su subsistencia en los bosques templados y bosques mesófilos de montaña principalmente. Como es el caso de 24 de las 28 especies analizadas, donde los principales ecosistemas son los bosques templados, bosques mesófilos de montaña, seguidos por selvas cálido-húmedas, selvas cálido-secas y desiertos (Valencia-A (2004), Oldfield y Eastwood (2007), Arizaga et al. (2009), Vázquez (2011), Mojica y Valencia (2017) y Sabás-Rosales et al., (2017)). De igual forma, los centros de diversidad identificados en las zonas montañosas del sureste de México coinciden con la distribución descrita por Nixon (2001) para las áreas con mayor diversidad de especies del género.

7.2. Efectos esperados del cambio climático para las especies amenazadas del género *Quercus* en México

La presión ocasionada por el cambio climático sobre la biodiversidad es aún incierta, la vulnerabilidad de las especies del género *Quercus* ante dicho fenómeno es específica para cada especie y dependerá de sus afinidades ambientales, sin embargo, se espera que todas aquellas especies amenazadas por el cambio climático se vean obligadas a modificar su distribución y abundancia, viéndose forzadas a migrar o adaptarse a las nuevas condiciones

ambientales (Peterson et al., 2005; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007). Los resultados del presente estudio muestran que las alteraciones en las variables climáticas como consecuencia del cambio climático, propuestas por los modelos de circulación de gases y los escenarios utilizados, tendrán efectos tanto en el tamaño como en la distribución potencial de las 28 especies analizadas. De acuerdo con lo anterior, se estima que las especies de encino que se desarrollan en zonas húmedas y frías (p. ej. *Quercus nixoniana*, *Q. magdougalli*, *Q. martinezii*) serán más vulnerables a las alteraciones que aquellas que se desarrollan en zonas semiáridas y subhúmedas (p. ej. *Quercus deliquescens*, *Q. paxtalensis*, *Q. puluhana*) (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007).

Entre las consecuencias ya mencionadas ante el cambio climático, se encuentra el posible desplazamiento de las especies hacia una mayor altitud, de acuerdo con Grabherr et al., (1994) dicho desplazamiento podría ocurrir a un ritmo de entre 8 y 10 m por década, limitando la permanencia de la especie en las cumbres montañosas, donde los efectos negativos del cambio climático serán más marcados, dejando en una posición aún más susceptible a la especie que las habitan (Grabherr et al., 1994; Nogués-Bravo et al., 2007; Gavilán, 2008). A partir de inspecciones visuales por medio de SIG realizados para las 28 especies de encino en conjunto, es posible sugerir que en principio la distribución altitudinal no se ve afectada significativamente, dado que las proyecciones muestran un margen de distribución altitudinal mayor al observado en la actualidad, sin embargo, para el caso particular de algunas especies (*Quercus elliptica*, *Q. galeanensis*, *Q. hintoniorum*, *Q. martinezii*, *Q. pinnativenulosa*, *Q. skinneri*), sí existe un desplazamiento altitudinal que coincide con lo encontrado en trabajos anteriores.

Otra de las implicaciones para las especies amenazadas de encinos en México bajo escenarios de cambio climático es la pérdida de áreas con idoneidad ambiental para su permanencia; se espera que las especies se vean afectadas por medio de reducciones significativas como ha sido reportado de forma previa por autores como Gómez-Mendoza y Arriaga (2007) y Gutiérrez y Trejo (2014). En este sentido, autores como Gómez-Mendoza y Arriaga (2007) describieron los cambios en la distribución potencial de 17 encinos para el año 2050 y reportaron una pérdida de la distribución geográfica actual de entre 7 y 48%; estos resultados concuerdan con lo observado en el presente estudio, donde la pérdida de la distribución potencial actual acumulada de las especies estudiadas va desde 5% hasta el 39%, con excepción de los resultados obtenidos por el modelo MPI-ESM-LR RCP 4.5, mismo que proyecta un aumento de un 11% en la distribución.

De acuerdo con el IPCC (2014) uno de los peligros latentes más preocupantes bajo escenarios de cambio climático es el creciente riesgo de extinción al que se enfrentarán un sinnúmero de especies, esto debido a una gran variedad de factores, entre ellos la posible falta de corredores biológicos por donde desplazarse en la búsqueda de condiciones propicias para la subsistencia, el corto lapso de tiempo con el que se cuenta para migrar de forma natural y la ocurrencia de incendios forestales (Mendoza-Maya et al., 2015).

En la actualidad, la pérdida de los hábitats naturales en todos los ecosistemas se ha convertido en un tema común y en un fenómeno aún más frecuente, siendo los bosques templados los que se han visto reducidos de una mayor manera por la influencia humana (Rzedowski, 1978). La interrupción de la conectividad natural entre poblaciones debido a actividades

antropogénicas ha provocado la fragmentación y aislamiento de las poblaciones, que conlleva a la pérdida de la diversidad biológica y afectando la abundancia y distribución de las especies (Keyghobadi et al., 2005; Herrera-Arroyo et al., 2013). En especies que dependen del viento y la gravedad para su polinización y dispersión de semillas como es el caso de los encinos, el incremento de las distancias entre los fragmentos disminuye de forma directa el alcance con los individuos, afectando el intercambio de semillas entre poblaciones y significando un riesgo para la permanencia de los encinos (Young et al., 1996).

El riesgo de extinción fue observado en 9 especies (*Quercus acherdophylla*, *Q. cedrosensis*, *Q. crispipilis*, *Q. galeanensis*, *Q. graciliformis*, *Q. devia*, *Q. macdougalli*, *Q. martinezii*, *Q. nixoniana*) de las 28 especies de encinos analizadas, donde los resultados indican que para el año 2080 y bajo al menos tres de los 4 escenarios considerados, perderán más del 95% de su distribución potencial actual, lo que significa un alto riesgo de extinción, además, dentro de estas especies se identificaron tres (*Quercus acherdophylla*, *Q. crispipilis* y *Q. devia*) que se podrían definir como “extintas en estado silvestre” dado que su distribución natural desaparece, pero surgen nuevas áreas con la condiciones óptimas para establecerse, por medio de colecciones *ex situ*, ya que de forma natural la especie difícilmente llegaría a tales lugares (IUCN, 2012); cabe mencionar que siete de dichas especies son endémicas de México, tema que se abordará más adelante.

Se conoce que las especies del género *Quercus* presentan endemismos regionales, puesto que cuentan con una distribución casi continua a través de una misma región con condiciones determinadas (Valencia-A, 2004). En México habitan aproximadamente 109 especies endémicas de encinos (Valencia-A, 2004), de las cuales 17 forman parte de este estudio, y como resultando del mismo se observaron siete encinos endémicos (*Quercus nixoniana*, *Q. martinezii*, *Q. macdougalli*, *Q. acherdophylla*, *Q. galeanensis*, *Q. cedrosensis*, *Q. devia*) que pierden la totalidad de condiciones climáticas apropiadas para su desarrollo para el año 2080. De las siete especies de encinos endémicos con mayor afectación por el cambio climático, cinco cuentan con una distribución restringida o microendemismos (*Quercus devia*, *Q. cedrosensis*, *Q. galeanensis*, *Q. acherdophylla*, *Q. macdougalli*) y solo dos (*Q. martinezii* y *Q. nixoniana*) cuentan con una distribución media; dichas especies restringidas en algunos casos están asociadas a un solo ecosistema. Estos resultados sugieren que las especies microendémicas presentan dos amenazas principales, la primera implícita en su distribución restringida, y la segunda el grado de amenaza por cambios en las condiciones climáticas. Seis (*Quercus galeanensis*, *Q. acherdophylla*, *Q. macdougalli*, *Q. martinezii*, *Q. nixoniana*, *Q. graciliformis*) de las nueve especies con mayor pérdida, además de contar con una distribución de media a restringida, están asociadas únicamente a ecosistemas de Bosque Mesófilo de Montaña, que como ya se ha mencionado, representa a unos de los ecosistemas más restringidos (1% del territorio nacional) y más susceptibles ante las alteraciones del cambio climático (CONABIO, 2010).

Se estima que los bosques mesófilos de montaña han perdido hasta un 50% de su área original en el planeta, y en México se espera una contracción drástica de la distribución del hábitat, con una pérdida de hasta el 68% para el año 2080, a pesar de ser considerado como el ecosistema terrestre con mayor diversidad biótica por unidad de área en el país (Rojas-Soto et al., 2012); una de las grandes amenazas para este ecosistema es la matorralización y el escaso tamaño o aislamiento de las comunidades vegetales, además de que los cambios

climáticos implican la llegada de vegetación de cinturones inferiores siguiendo las condiciones a las que están adaptadas y aumentando la pérdida del hábitat para las especies que ya habitan las cumbres más altas, resultando físicamente imposible responder mediante el desplazamiento de su límite superior (Escudero A. et al., 2012).

Las poblaciones de alta montaña tenderán a responder desplazándose altitudinalmente cuando esto sea posible, o de lo contrario, extinguirse (Escudero A. et al., 2012). De igual forma, Cuesta-Camacho et al. (2008) en su estudio con especies de los Andes Tropicales, encontró un patrón de pérdida, donde el mayor grado de afectación se observó en especies climáticamente marginales o restringidas a páramos y valles de la región.

La posibilidad de una especie para mantenerse bajo la imposición de nuevas condiciones climáticas puede estar relacionada con procesos como la tolerancia fisiológica, mecanismos de compensación, y otros más que implican cambios en las interacciones bióticas que favorecen la persistencia local de las mismas, además de la alternativa de adaptarse a las nuevas condiciones (Escudero A. et al., 2012). De acuerdo con Gómez-Mendoza y Arriaga, (2007), las especies de encino distribuidas en los ecosistemas de los climas templados y cálidos pueden ser favorecidas por las variaciones climáticas e incrementar su distribución. Con base en lo ya mencionado, en el presente estudio se identificaron 10 especies con altas posibilidades de mantener su distribución potencial actual bajo las condiciones del cambio climático, cinco especies (*Quercus pinnativenulosa*, *Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. subspathulata*, *Q. uxoris*) muestran un aumento que va desde el nueve hasta el 600% y las cinco especies restantes (*Quercus acutifolia*, *Q. affinis*, *Q. paxtalensis*, *Q. skinneri* y *Q. xalapensis*) cuentan con los porcentajes de pérdida más bajos (menores al 65% en al menos tres de las cuatro proyecciones). Cabe mencionar que 6 de las 10 especies cuentan con una distribución amplia y todas las especies están asociadas a más de un ecosistema a través del territorio del país, dicha característica puede ser clave, para su persistencia en el futuro.

7.3. Coincidencia entre evaluaciones de riesgo de extinción y los comportamientos esperados bajo Cambio Climático observados

Con los recientes cambios en la categorización de riesgo en la “RedList”, especies presentes en este estudio fueron reevaluadas cambiando su categoría de riesgo, viéndose beneficiadas o en algunos casos vulneradas. Resultan principalmente alarmante el caso de especies como *Quercus nixoniana*, *Q. crispipilis* y *Q. calophylla*, que ya no aparecen en la “RedList” y que, de acuerdo con el presente estudio, muestran porcentajes de pérdida preocupantes. *Quercus martinezii*, *Q. germana*, *Q. glabrescens* y *Q. elliptica* también muestran pérdidas suficientes para conservar la clasificación anterior, mientras que el resto de las reclasificaciones van más de acuerdo con los resultados obtenidos por el presente estudio.

7.4. Áreas Naturales Protegidas y Jardines Botánicos

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, se pudo observar que para el caso de las ANP en México, el problema inmediato no radica en los retos del cambio climático sino en la falta de programas efectivos para la protección de encinos en el país, ya que la mayor variación de la pérdida de áreas con idoneidad ambiental para las 28 especies en conjunto, entre el presente y las proyecciones a futuro es de apenas un 4%; mientras que en la actualidad solamente un 10.8% y 9.6% de la distribución acumulada de los 28 encinos

estudiados y de la superficie de los centros de diversidad de encinos respectivamente, está siendo protegida dentro de éstas áreas, lo cual resulta alarmante ya que deja a varias especies de encinos sin protección.

Los resultados aquí mencionados sustentan las recomendaciones propuestas por autores como Torres-Miranda et al., (2011), quienes proponen la priorización de la conservación en aquellas áreas sin protección oficial, ampliando las ANP existentes y creando nuevas que sean capaces de abarcar una mayor cantidad de especies de encinos en riesgo. El Programa de Conservación de Especies en Riesgo 2007-2012 (PROCER) contemplado dentro del Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018 no contiene ninguna especie de encino dentro de su lista y sólo abarca a una especie vegetal; dicho programa asigna recursos a iniciativas de conservación de especies en riesgo y su hábitat, y está dirigido a instituciones académicas o asociaciones civiles con intenciones de investigación, sin embargo, cuenta como requisito principal que las especies que se busquen conservar estén consideradas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, así pues, gran parte del problema que amenaza a la supervivencia de las especies de encino en México es la falta de conocimiento en cuanto a su situación actual y vulnerabilidad, dicho desconocimiento por parte de las instituciones gubernamentales pertinentes dificultan cualquier esfuerzo por incluir a los encinos en planes de conservación a cualquier nivel de organización.

De igual forma, los Jardines Botánicos del país resultan insuficientes para el resguardo de las especies amenazadas de encinos, ya que en su mayoría, aquellos jardines identificados en las cercanías de los centros de diversidad de encinos, concentran especies de matorral xerófilo, y solo el 40% de las especies que se albergan corresponden a especies raras, amenazadas o en peligro de extinción; si bien los jardines botánicos se ubican de acuerdo a la regionalización del país para albergar especies nativas de las mismas, su alcance en tipos de vegetación tales como el bosque de coníferas y el bosque mesófilo de montaña aún es bajo (Rodríguez, 1999). La región sur este del país donde la presencia de encinos amenazados es amplia, está poco representada en los jardines ya que la existencia de los mismos en dicha región es muy baja en comparación con regiones como la Faja Volcánica Trans Mexicana.

Cabe mencionar que entre los objetivos principales de los jardines además de los programas de conservación, se encuentran las actividades de educación y difusión, además de la investigación taxonómica, etnobotánica y de la propagación, por lo que desde su creación los jardines botánicos se han enfrentado a problemas de tipo económico y de infraestructura, así como de espacios limitados para dichas actividades. Es necesario intensificar las relaciones con las instituciones gubernamentales pertinentes, a fin de que se apoyen los programas de conservación de determinadas especies, géneros o familias, además de incentivar la relación de los jardines mexicanos con otros jardines del mundo y lograr la colaboración mutua en proyectos benéficos para ambas partes (Rodríguez, 1999).

Por otro lado, durante las últimas décadas los bosques se han visto afectados por la disminución de sus superficies para la transformación en áreas de cultivo y pastoreo, dicho proceso ha desencadenado un incremento en el aislamiento geográfico y en la reducción de la conectividad entre los parches de bosque, lo cual influye en el flujo génico y permanencia de especies arbóreas que allí habitan. Se ha observado que para las especies que se polinizan por viento, tal como es el caso de los encinos, la conectividad entre los parches (sin importar

su tamaño) es más importante que contar con grandes superficies aisladas entre ellas (Oyama et al., 2017). De acuerdo al PNANP 2014-2018, para el año 2014 únicamente 18 ANP de las 182 existentes se encontraban incorporadas en esquemas de conectividad tales como corredores biológicos, ecológicos y complejos de ANP para conservar, restaurar o recuperar la integridad biológica, teniendo como meta para el 2018 un total de 55 ANP como parte de dichos esquemas; así pues, la fragmentación de los bosques representa otro reto para la permanencia de los encinos en México, a pesar de que la solución aparentemente está en proceso, la velocidad acelerada en la que los bosques se siguen perdiendo y el cambio climático avanzan, creando una mayor necesidad de programas de atención para los encinos a corto plazo.

En este punto y bajo el contexto ya mencionado, los jardines botánicos resultan una propuesta viable para el apoyo y rescate de los encinos, ya sea con el establecimiento de colecciones *ex situ* favoreciendo la conectividad entre los parches, o bien, como los ejecutores de procesos de reforestación o conservación a nivel local; es necesario un fuerte vínculo entre las áreas protegidas y los jardines botánicos, que permita aprovechar el enorme potencial que esto representa.

8. Conclusiones

Las alteraciones en las variables climáticas como consecuencia del cambio climático, propuestas por los modelos de circulación de gases y los escenarios utilizados, tendrán efectos tanto en el tamaño como en la distribución de las 28 especies analizadas. Se observó una pérdida de la distribución potencial actual acumulada que va desde el 5% hasta el 39%, con excepción de los resultados arrojados por el modelo MPI-ESM_LR RCP 4.5, mismo que proyecta un aumento de un 11% en la distribución.

Se identificaron 9 especies (*Q. acherdophylla*, *Q. cedrosensis*, *Q. crispipilis*, *Q. galeanensis*, *Q. graciliformis*, *Q. devia*, *Q. macdougalli*, *Q. martinezzi*, *Q. nixoniana*) de las 28 especies de encinos analizadas, donde los resultados indican que para el año 2080 y bajo al menos tres de los 4 escenarios considerados, perderán más del 95% de su distribución potencial actual, 7 de ellas (*Q. nixoniana*, *Q. martinezii*, *Q. macdougalli*, *Q. acherdophylla*, *Q. galeanensis*, *Q. cedrosensis*, *Q. devia*) son endémicas, además, se identificaron tres (*Q. acherdophylla*, *Q. crispipilis* y *Q. devia*) que se podrían definir como “extintas en estado silvestre”.

De las siete especies de encinos endémicos con mayor afectación por el cambio climático, cinco cuentan con una distribución restringida o microendemismos (*Q. devia*, *Q. cedrosensis*, *Q. galeanensis*, *Q. acherdophylla*, *Q. macdougalli*) y solo dos (*Q. martinezii* y *Q. nixoniana*) cuentan con una distribución media.

Se identificaron 10 especies con altas posibilidades de mantener su distribución potencial actual bajo las condiciones del cambio climático, cinco especies (*Quercus pinnativenulosa*, *Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. subspatulata*, *Q. uxoris*) muestran un aumento que va desde el nueve hasta el 600% y las cinco especies restantes (*Quercus acutifolia*, *Q. affinis*, *Q. paxtalensis*, *Q. skinneri* y *Q. xalapensis*) cuentan con los porcentajes de pérdida más bajos (menores al 65% en al menos tres de las cuatro proyecciones). Cabe mencionar que 6 de las 10 especies cuentan con una distribución amplia y todas las especies están asociadas a más de un ecosistema a través del territorio del país.

Esto sugiere que la vulnerabilidad de las especies de encino estudiadas está definida no solo por la magnitud de los cambios en el comportamiento de variables ambientales bajo los diferentes escenarios de cambio climático global, sino también, por la amplitud de su distribución actual y la variabilidad de ecosistemas asociados a estas.

Actualmente, solo el 10.8% y 9.6 % de la distribución acumulada de las especies de encino estudiados y de las superficie de los centros de diversidad, respectivamente, está siendo protegida dentro de alguna categoría de ANP; por lo cual, el cambio climático, se ha convertido en un factor imprescindible a considerar durante el planteamiento de estrategias y planes de conservación y restauración, como en el caso de las 19 ANP que perderán más del 50% del área con idoneidad ambiental, donde es importante comenzar a recolectar las especies de encino que en ellas habitan y destinar programas para su resguardo y supervivencia en los jardines botánicos, de igual forma para las 28 ANP que solo cuentan con idoneidad ambiental bajo las proyecciones a futuro, cuentan con una gran importancia en proyectos de conservación y restauración con técnicas como la migración asistida y similares, por lo tanto, los esfuerzos de conservación para el género *Quercus* en México

deben llevarse a la par con el apoyo de los jardines botánicos, las ANP e instituciones gubernamentales pertinentes.

Como ya se mencionó, para caso de las ANP y Jardines Botánicos en México, el primer problema a resolver no son los retos del cambio climático, sino la falta de programas efectivos para la protección de los encinos en el país; dicho esto, el primer paso para conservar al género *Quercus*, es que las instituciones pertinentes en México reconozcan su importancia, así como su vulnerabilidad actual y ante los futuros retos del cambio climático, de esta forma lograr la inserción de las especies de encino en riesgo en proyectos prioritarios de conservación tanto *in situ* como *ex situ*.

Además de promover un sistema de conservación que involucre la participación de comunidades locales, en las principales regiones con presencia de encinos amenazados (Sierra Madre Oriental, los Altos de Chiapas, Sierra Madre del Sur, el Soconusco y la Sierra de Juárez), creando conciencia en sus habitantes acerca de los problemas ambientales e incentivando el desarrollo humano y el mantenimiento de los ecosistemas por parte de los dueños de las tierras. Ejemplo exitoso de esto es el caso de la región de la Sierra de Juárez en Oaxaca donde la creación de una red de corredores alternos a las áreas naturales protegidas (Áreas de Conservación Indígena y Comunal (ACIC)), conectan diferentes tierras comunales a fin de proteger los bosques montanos de la región, actualmente este programa protege cerca de 15 especies de encinos, muchas de estas no presentes en ANP, a pesar de contar con solo el 10% del tamaño de las ANP decretadas oficialmente, muestra indudable del éxito de dicho programa.

Otros ejemplos exitosos de conservación alternos a las ANP son la Unión de Comunidades Zapoteca-Chinantecas (UZACHI) y la Unión de Comunidades y Ejidos Forestales Oaxaqueños (UCEFO) quienes han logrado el mantenimiento de la vegetación primaria y la recuperación de áreas boscosas existentes en los bosques montanos oaxaqueños (Ramírez Toro, 2017). Dichos programas favorecen significativamente la conservación de los bosques e incluso contribuyen a atenuar conflictos sobre la propiedad de la tierra, tema que suele ocasionar problemas para el establecimiento de programas de conservación de áreas naturales. La creación de programas similares a las ACIC, la concientización de las comunidades locales de la mano de los Jardines Botánicos y las Áreas Naturales Protegidas forman una red capaz de conectar las áreas protegidas decretadas oficialmente con las áreas comunales protegidas y capaces de conservar los bosques montanos de México y a su vez la gran mayoría de encinos amenazados del país.

9. Bibliografía

- Africam Safari, 2016. Programa de conservación del Bosque de Encino. Recuperado el 17 de enero, 2018 de: <https://www.africansafari.com/programa-conservacion-bosque-de-encinos.html>.
- Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica. 2008. Plan de Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Centroamérica y el Ave Migratoria *Dendroica chrysoparia*. Editores: E.S. Pérez, E. Secaira, C. Macías, S. Morales e I. Amezcua. Fundación Defensores de la Naturaleza y The Nature Conservancy. Guatemala.
- Anderson R. P. 2013. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1297: 8–28.
- Anderson, R. P. 2015. El modelado de nichos y distribuciones: No es simplemente “clic, clic, clic”. *Biogeografía*, 8, 4-27.
- Arizaga, S.; Martínez, J.; Salcedo, M. y Bello, M.A. (2009). Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos.
- Arriaga, L., C. Aguilar, D. Espinosa y R. Jiménez (coords.) 1997. Regionalización ecológica y biogeográfica de México. Taller de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Baldwin, R.A. 2009: Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy* 11: 854-866.
- BID. 2015. Trayectorias de Concentración Representativas RCP. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado el 7 de marzo, 2018 de : <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/trayectorias-de-concentracion-representativas-rcp>.
- Callicott, J.B., L.B. Crowder, y K. Mumford. 1999. Current normative concepts in conservation. *Conservation Biology* 13:22-35.
- Cavazos, T.; Salinas, J. A.; Martínez, B.; Colorado, G.; de Grau, P.; Prieto-González, R.; Conde-Álvarez, A. C.; Quintanar-Isaías, A.; Santana-Sepúlveda, J. S.; Romero-Centeno, R.; Maya-Magaña, M. E.; Rosario de La Cruz, J. G.; Ayala-Enríquez, Ma. del R.; Carrillo-Tlazanatz, H.; Santiesteban, O. y Bravo, M. E. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC.150 pp.
- Cavender-Bares, J. (2016). Diversity, distribution and ecosystem services of the North American oaks. *International Oaks*, 27, 37-48.
- CDB. 1992. Convenio sobre la Diversidad Biológica. Río de Janeiro. Brasil. En: <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>.
- Challenger, A. 1998. La zona ecológica templada húmeda (el bosque mesófilo de montaña). En: Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México, Pasado, Presente y Futuro. CONABIO. México. Pp. 443-518.
- Chávez, F.Z. 1998. Observaciones sobre la distribución de encinos en México. *Polibotánica*, 8:47-64.
- CITES (2003) CITES species list. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora.

- CONABIO. 1997. Provincias biogeográficas de México. Escala 1 : 4 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, Distrito Federal, México. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bMesofilo.html>.
- CONABIO. 2016. Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (ENBioMex) y Plan de Acción 2016-2030. CONABIO, México.
- Corradi, M. R. (2016). Cambio climático global. *Cambio climático global: vulnerabilidad, adaptación*, 35.
- Cox, C. B., Ladle, R., & Moore, P. D. (1976). *Biogeography: an ecological and evolutionary approach*. John Wiley & Sons.
- Crisci, J., Katinas, L., Posadas, P. (2009). *Historical biogeography: an introduction*. Harvard University Press.
- Cuesta-Camacho, F., Peralvo, M., & Ganzenmüller, A. (2008). Posibles efectos del calentamiento global sobre el nicho climático de algunas especies en los Andes Tropicales. *Páramo y cambio climático*.
- Denisse, S. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010: Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo.
- Denk T, Grimm GW, Manos PS, Deng M, Hipp AL. 2017. An updated infrageneric classification of the oaks: review of previous taxonomic schemes and synthesis of evolutionary patterns. In: Gil-Pelegrin E, Peguero-Pina J, Sancho-Knapik D, eds. Oaks physiological ecology. Exploring the functional diversity of genus Quercus L. Cham, Switzerland: Springer, 13–38.
- Dixon, R. K., Solomon, A. M., Brown, S., Houghton, R. A., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185-190.
- Escalante, T. y R. Morales. 2015. Biogeografía de la conservación: prioridades y desafíos. *Biogeografía* 8: 36-44.
- Escudero, A., García-Camacho, R., García-Fernández, A., Gavilán, R.G., Giménez-Benavides, L., Iriondo, J.M., Lara-Romero, C., Morente, J., Pescador, D.S. (2012). Vulnerabilidad al cambio global en la alta montaña mediterránea. *Ecosistemas* 21(3):63-72. Doi.: 10.7818/ECOS.2012.21-3.08.
- Espinosa, D., S. Ocegueda et al. 2008. El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural, en *Capital natural de México*, vil. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pp. 33-65.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Galindo-Castañeda, Tania & Correa, Diego. (2006). Caracterización fisionómica de un relicto de bosque de roble ubicado en la vereda El Ocaso, municipio de Bojacá, Colombia.
- Gavilán, R. G. 2008. La vegetación de alta montaña. In *Avances en biogeografía*, M. Redondo, M. Palacios, F. López, T. Santamaría y D. Sánchez (eds.). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia, Madrid. p. 165-174.

- González-Espinosa, M., Meave, J.A., Ramírez-Marcial, N., Toledo-Aceves, T., Lorea-Hernández, F.G., Ibarra-Manríquez, G. (2012). Los bosques de niebla de México: conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas* 21(1-2):36-54
- Gomez-Mendoza L, Arriaga L (2007) Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of México. *Conserv Biol* 21(6):1545–1555
- Grabherr, G., Gottfried y Pauli, G. 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature* 369: 448.
- Gutierrez, Erick & Trejo, Irma. (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. 10.7550/rmb.37737.
- Gutiérrez, R.P., Bárcenas, R. 2008. Catálogo de encinos (*Quercus spp.*) del herbario de la UAQ, en el estado de Querétaro, México.
- Herrera-Arroyo, M.L., Sork, V.L., González-Rodríguez, A., Rocha-Ramírez, V., Vega, E. & Oyama, K. (2013). Seed-mediated connectivity among fragmented populations of *Quercus castanea* (Fagaceae) in a Mexican landscape. *Am J Bot*, 100, 1663-1671.
- Hipp, A. (2018). Sympatric parallel diversification of major oak clades in the Americas and the origins of Mexican species diversity. *New Phytologist*, 439-452.
- Houghton, J.T., Callander, B.A., and Varney, S.K., 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. pp. 365.
- IICA. 2010. Estrategia en recursos fitogenéticos para el Cono Sur. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), PROCISUR, Montevideo, Uruguay. 172p. Recuperado el 16 de agosto, 2018 de: <http://www.iica.int>.
- Illoldi-Rangel, Patricia, & Escalante, Tania, (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, vol. 3, p 7-12.
- INEGI. 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 2 de abril, 2018 de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>.
- INEGI. 2019. Extensión territorial. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 15 de diciembre, 2019 de: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/extension/default.aspx?tema=T>.
- IPCC. 2013: “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC. 2014. Summary for policymakers. *In: Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Groups II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, et al. (eds.)]. Cambridge University Press.
- IPCC. 2019. Special Report. Global Warming of 1.5°C. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado el 27 de febrero, 2019 de: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- IUCN (2003). Red list of threatened species. World Conservation Union.
- IUCN (2012). Categorías y Criterios de la Lista Roja de la IUCN: Versión 3.1. Segunda edición. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: IUCN.

- IUCN (2013). Documentation standards and consistency checks for IUCN Red List assessments and species accounts. Version 2. Adopted by the IUCN Red List Committee and IUCN SSC Steering Committee. Consultado en línea http://www.iucnredlist.org/documents/RL_Standards_Consistency.pdf.
- Johnson, P. S., Shifley, S. R., Rogers, R., Dey, D. C., & Kabrick, J. M. (2019). *The ecology and silviculture of oaks*. Cabi.
- Kappelle, M. 2006. Ecology and conservation of Neotropical montane oak forests Volume 185. Springer Science & Business Media.
- Keyghobadi N, Roland J, Matter SF, Strobeck C. 2005. Among- and within-patch components of genetic diversity respond at different rates to habitat fragmentation: an empirical demonstration. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 272, 553-560.
- Lascuráin, M., et al. 2009. Conservación de especies *ex situ*, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 517-544.
- Luna, A., Montalvo, L., & Rendón, B. (2003). Los Usos no Leñosos de los Encinos en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* (72), 107-117.
- Mateo, R. G., M. Felicísimo y J. Muñoz. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural* 84: 217-240.
- Marco C. Simeone, Roberta Piredda, Alessio Papini, Federico Vessella, Bartolomeo Schirone; Application of plastid and nuclear markers to DNA barcoding of Euro-Mediterranean oaks (*Quercus*, Fagaceae): problems, prospects and phylogenetic implications, *Botanical Journal of the Linnean Society*, Volume 172, Issue 4, 1 August 2013, Pages 478–499, <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1111/boj.12059>
- Margules CR, Sarkar S. 2009. Planeación sistemática de la conservación. México, D.F.: UNAM-CONANP-CONABIO.
- Mendoza-Maya, E., Espino-Espino, J., Quiñones-Pérez, C. Z., Flores-López, C., Wehenkel, C., Vargas-Hernández, J. J., & Sáenz-Romero, C. (2015). Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de picea en peligro de extinción. *Revista fitotecnica mexicana*, 38(3), 235-247.
- Mittermeier RA, Robles Gil P, Mittermeier CG. 1997. Megadiversity. Mexico City (Mexico): CEMEX.
- Mojica, E. P., & Valencia, S. 2017. Estudio preliminar del género *Quercus* (Fagaceae) en Tamaulipas, México Preliminary study of the genus *Quercus* (Fagaceae) in Tamaulipas, Mexico.
- Montes-Hernández, B., & López-Barrera, F. (2013). Seedling establishment of *Quercus insignis*: A critically endangered oak tree species in southern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 310, 927-934.
- Müller, C. H. (1936). New and noteworthy trees in Texas and Mexico. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 147-155.
- Nixon, K. 1993. Infrageneric classification of *Quercus* (Fagaceae) and typification of sectional names. *Annals of Forest Science* 50, 25–34.
- Nixon, K. (2001). Global and Neotropical Distribution and Diversity of Oak (genus *Quercus*) and Oak Forests. En M. Kappelle, *Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak Forests* (págs. 34-43). San José, Costa Rica: Springer.

- Nixon K.C. 2009. An overview of *Quercus*: Classification and phylogenetics with comments on differences in wood anatomy.
- Nogués-Bravo, D., M. B. Araujo, M. P. Errea, M. P. y J. P. Martínez-Rica. 2007. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17:420-428.
- Oldfield S, Eastwood A. 2007. *The Red List of oaks*. Cambridge, UK: Fauna & Flora International.
- Ordóñez Díaz, María de Jesús; Ordóñez Díaz, José Antonio B. 1999. Cambio climático global. en Rodríguez Vangort, Frances; Garza Salinas, Mario. Memoria del seminario: La nación ante los desastres, retos y oportunidades hacia el siglo XXI. México, D.F, México. Dirección General de Protección Civil; México. Red Mexicana de Estudios Interdisciplinarios para la Protección de Desastres, oct. 1999. p.101-9.
- Oyama, K., Herrera-Arroyo, M. L., Rocha-Ramírez, V., Benítez-Malvido, J., Ruiz-Sánchez, E., & González-Rodríguez, A. (2017). Gene flow interruption in a recently human-modified landscape: The value of isolated trees for the maintenance of genetic diversity in a Mexican endemic red oak. *Forest Ecology and Management*, 390, 27–35. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.01.018>.
- Pérez-Ramos, I.M., Villar, R., Marañón, T. 2014. El fascinante mundo de los *Quercus*: desde la biología molecular hasta la ecología de comunidades. *Ecosistemas* 23(2):1-4. Doi.: 10.7818/ECOS.2014.23-2.01
- Peterson AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Martínez-Meyer E, Nakamura M, Araújo MB. 2011. *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press. Monographs in Population Biology, 49.
- Peterson, A. T., H. Tian, E. Martínez-Meyer, J. Soberón y V. Sánchez-Cordero. 2005. Modeling ecosystems shifts and individual species distribution shifts. In *Climate change and biodiversity*, T. Lovejoy y L. Hannah (eds.). Yale University Press, Connecticut. p. 211-228.
- Phillips, S., Anderson, R., y Schapire, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190:231-259.
- PNANP (2014). Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- PND (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Gobierno de la República. Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018.
- Primack, R. 1995. *A primer of conservation biology*. Sinauer- Sunderland. USA, 277 pp.
- Ramírez, J. 1899. *La vegetación de México*. Secretaría de Fomento, México.
- Ramírez Toro, Wilfrido. (2017). "Análisis biogeográfico del género *Quercus* (Fagaceae) y estructura genética de *Q. candicans*, *Q. crassifolia* y *Q. castanea* para establecer áreas prioritarias para la conservación de encinos en el estado de Oaxaca, México". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/71258>.
- Rodríguez Acosta, M. 1999. Los jardines botánicos de México: análisis y perspectivas. *CONABIO. Biodiversitas*, 23:9-15.
- Rodríguez-Correa, H., K. Oyama, I. MacGregor-Fors, and A. González-Rodríguez. 2015. How are oaks distributed in the Neotropics? A perspective from species turnover, areas

of endemism, and climatic niches. *International Journal of Plant Sciences* 176, no.3, 222-231.

- Rodríguez, I., & Romero, S. (2007). Arquitectura Foliar de Diez Especies de Encino (*Quercus*, FAGACEAE) de México. *Acta Botánica Mexicana*, 81, 9-34.
- Rodríguez Rivera, Isaac Said; Romero Rangel, Silvia Arquitectura foliar de diez especies de encino (*Quercus*, fagaceae) de México *Acta Botánica Mexicana*, núm. 81, octubre, 2007, pp. 9-34
- Rodríguez-Sánchez, F. (2011). Un análisis integrado de la respuesta de las especies al cambio climático: biogeografía y ecología de árboles relictos en el Mediterráneo. *Ecosistemas* 20(1):177-184.
- Rojas-Soto O.R., Sosa V. and Ornelas J.F. 2012. Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation* 21:2671-2690.
- RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México, D.F. pp.
- Sabás-Rosales, J. L., Siqueiros-Delgado, M. E., Valencia-Ávalos, S., & Enríquez-Enríquez, E. D. (2017). Reconocimiento taxonómico de seis especies arbustivas de encinos (*Quercus* secc. *Quercus*: Fagaceae). *Polibotánica*, (44), 11-38.
- Sánchez-Rojas G. 2009. ¿Qué es la biología de la conservación? Pp 7 -13 En Cátedra Nacional de Biología (2008). Juan Luis Cifuentes Lemus. Biología de la Conservación II. Ecología. Zuria, I., Castellanos, I., Moreno, C.E., Ortiz-Pulido, R., Pavón, N. Ramírez-Bautista, A., A. Rojas-Martínez & G. Sánchez-Rojas (Compiladores) 2009. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo 103 pp. ISBN 978-607-482-051-5.
- Sato, N., P. J. Sellers, D.A. Randall, E. K. Schneider, J Shukla, J. L. Kinter III, Y-T. Hou and E. Albertazzi, 1989. Effects of implementing the simple biosphere model in a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences* 46:2757-2769.
- Schirone B, Radoglou K, Vessella F (2016) Conservation and restoration strategies to preserve the variability of cork oak *Quercus suber*-a Mediterranean forest species-under global warming. *Clim Res* 71:171-185.
- SEMARNAT (2010) Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Sheffield, J., A. Barrett, D. Barrie, S.J. Camargo, E.K.M. Chang, B. Colle, D.N. Fernando, R. Fu, K.L. Geil, Q. Hu, X. Jiang, N. Johnson, K.B. Karnauskas, S.T. Kim, J. Kinter, S. Kumar, B. Langenbrunner, K. Lombardo, L.N. Long, E. Maloney, A. Mariotti, J.E. Meyerson, K.C. Mo, J.D. Neelin, S. Nigam, Z. Pan, T. Ren, A. Ruiz-Barradas, R. Seager, Y.L. Serra, A. Seth, D.- Z. Sun, J.M. Thibeault, J.C. Stroeve, C. Wang, S.-P. Xie, Z. Yang, L. Yin, J.-Y. Yu, T. Zhang, and M. Zhao, 2014: Regional Climate Processes and Projections for North America: CMIP3/CMIP5 Differences, Attribution and Outstanding Issues. NOAA Climate Program Office, Silver Spring, MD. 47 pp. <http://dx.doi.org/10.7289/V5DB7ZRC>.
- Simeone, M.C., Piredda, R., Papini, A., Vessella, F. & Schirone, B. 2013. Application of plastid and nuclear markers to DNA barcoding of Euro-Mediterranean oaks (*Quercus*, Fagaceae): problems, prospects and phylogenetic implications. *Botanical Journal of the Linnean Society* 172, 478–499.

- Soberón J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters* 10: 1115–1123.
- Soberón J, Nakamura M. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 19644–19650.
- Soulé, M. 1985. What is conservation biology? *Bioscience* 35(11): 727-734.
- Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J. A., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. 2011. Tropical montane cloud forests: current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico, *Journal of Environmental Management* 92:974-981.
- Torres-Miranda A, Luna-Vega I, Oyama K. 2011. Conservation biogeography of red oaks (*Quercus*, section Lobatae) in Mexico and Central America. *American Journal of Botany* 98(2): 290-305.
- Trelease, W. (1924). Four generations of memorable botanists. *The Scientific Monthly*, 19(1), 53-62.
- Trombulak, S.C. 1993. Undergraduate education and the next generation of conservation biologists. *Conservation Biology* 8:589-591.
- Valencia A., Susana; (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, diciembre -Sin mes, 33-53.
- Vázquez, A. (2011). *Ecología de comunidades vegetales en un gradiente altitudinal en la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Warren, D. L., Glor, R. E., & Turelli, M. (2010). ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 33(3), 607-611.
- Wei, T., Simko, V., Levy, M., Xie, Y., Jin, Y., & Zemla, J. (2017). Package ‘corrplot’. *Statistician*, 56, 316-324.
- Whittaker RJ, Araújo MB, Jepson P, Ladle RJ, Watson JEM, Willis KJ. 2005. Conservation biogeography: Assessment and prospect. *Diversity and Distributions* 11, 3–23.
- Wilson E.O. 1992. *La Diversidad de la Vida. (The Diversity of Life)* Drakontos, Crítica Grijalbo S.A. Barcelona.
- Young A, Boyle T, Brown T. 1996. The population genetic consequences of habitat fragmentation for plants. *Trends in Ecology & Evolution* 11, 413-418.
- Zavala Chávez, Fernando. Observaciones sobre la distribución de encinos en México *Polibotánica*, núm. 8, septiembre, 1998, pp. 47-64.

10. Anexos

Tabla A1

Figura	Nombre del archivo	Descripción
Fig.1	acher_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acherdophylla</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	acher_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acherdophylla</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	acher_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acherdophylla</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	acher_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acherdophylla</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	acher_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. acherdophylla</i> .
Fig.2	acher_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. acherdophylla</i> . Rojo=P1; Verde=P3; Azul=Presente
	acher_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. acherdophylla</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.3	acuti_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acutifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	acuti_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acutifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	acuti_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acutifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	acuti_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. acutifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	acuti_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. acutifolia</i> .
Fig.4	acuti_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. acutifolia</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	acuti_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. acutifolia</i> . Rojo=P2; Verde=P4; Azul=Presente
Fig.5	affi_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. affinis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	affi_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. affinis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	affi_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. affinis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	affi_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. affinis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	affi_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. affinis</i> .

Fig.6	affi_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. affinis</i> . Rojo=P1; Verde=P3; Azul=Presente
	affi_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. affinis</i> . Rojo=P2; Verde=P4; Azul=Presente
Fig.7	candi_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. calophylla</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	candi_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. calophylla</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	candi_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. calophylla</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	candi_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. calophylla</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	candi_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. calophylla</i> .
Fig.8	candi_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. calophylla</i> . Rojo=P1; Verde=P3; Azul=Presente
	candi_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. calophylla</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.9	crispi_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. crispipilis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	crispi_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. crispipilis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	crispi_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. crispipilis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	crispi_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. crispipilis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	crispi_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. crispipilis</i> .
Fig.10	crispi_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. crispipilis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	crispi_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. crispipilis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.11	devia_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. devia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	devia_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. devia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	devia_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. devia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	devia_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. devia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	devia_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. devia</i> .

Fig.12	devia_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. devia</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	devia_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. devia</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.13	ellip_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. elliptica</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	ellip_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. elliptica</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	ellip_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. elliptica</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	ellip_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. elliptica</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	ellip_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. elliptica</i> .
Fig.14	ellip_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. elliptica</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	ellip_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. elliptica</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.15	galea_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. galeanensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	galea_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. galeanensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	galea_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. galeanensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	galea_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. galeanensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	galea_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. galeanensis</i> .
Fig.16	galea_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. galeanensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	galea_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. galeanensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.17	gracili_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. graciliformis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	gracili_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. graciliformis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	gracili_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. graciliformis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	gracili_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. graciliformis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	gracili_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. graciliformis</i> .

Fig.18	gracili_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. graciliformis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	gracili_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. graciliformis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.19	hinto_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hintoniorum</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	hinto_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hintoniorum</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	hinto_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hintoniorum</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	hinto_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hintoniorum</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	hinto_presente	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. hintoniorum</i> .
Fig.20	hinto_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. hintoniorum</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	hinto_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. hintoniorum</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.21	hirti_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hirtifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	hirti_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hirtifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	hirti_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hirtifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	hirti_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. hirtifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	hirti_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. hirtifolia</i> .
Fig.22	hirti_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. hirtifolia</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	hirti_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. hirtifolia</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.23	nixon_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. nixoniana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	nixon_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. nixoniana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	nixon_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. nixoniana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	nixon_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. nixoniana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	nixon_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. nixoniana</i> .

Fig.24	nixon_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. nixoniana</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	nixon_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. nixoniana</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.25	paxta_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. paxtalensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	paxta_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. paxtalensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	paxta_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. paxtalensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	paxta_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. paxtalensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	paxta_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. paxtalensis</i> .
Fig.26	paxta_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. paxtalensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	paxta_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. paxtalensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.27	pinnati_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	pinnati_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	pinnati_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	pinnati_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	pinnati_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> .
Fig.28	pinnati_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	pinnati_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. pinnativenulosa</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.29	sapo_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. sapotifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	sapo_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. sapotifolia</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	sapo_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. sapotifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	sapo_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. sapotifolia</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	sapo_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. sapotifolia</i> .

Fig.30	sapo_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. sapotifolia</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	sapo_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. sapotifolia</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.31	skinn_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. skinneri</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	skinn_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. skinneri</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	skinn_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. skinneri</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	skinn_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. skinneri</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	skinn_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. skinneri</i> .
Fig.32	skinn_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. skinneri</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	skinn_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. skinneri</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.33	uxoris_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. uxoris</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	uxoris_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. uxoris</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	uxoris_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. uxoris</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	uxoris_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	uxoris_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. uxoris</i> .
Fig.34	uxoris_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. uxoris</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	uxoris_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. uxoris</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.35	xala_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	xala_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	xala_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	xala_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	xala_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. xalapensis</i> .

Fig.36	xala_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. xalapensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	xala_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. xalapensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.37	ajoe_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. ajoensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	ajoe_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. ajoensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	ajoe_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. ajoensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	ajoe_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. ajoensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	ajoe_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. ajoensis</i> .
Fig.38	delique_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. deliquescens</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	delique_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. deliquescens</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	delique_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. deliquescens</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	delique_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. deliquescens</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	delique_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. deliquescens</i> .
Fig.39	delique_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. deliquescens</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	delique_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. deliquescens</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.40	germa_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. germana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	germa_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. germana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	germa_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. germana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	germa_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. germana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	germa_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. germana</i> .
Fig.41	germa_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. germana</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	germa_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. germana</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4

Fig.42	glabr_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. glabrescens</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	glabr_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. glabrescens</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	glabr_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. glabrescens</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	glabr_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. glabrescens</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	glabr_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. glabrescens</i> .
Fig.43	glabr_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. glabrescens</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	glabr_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. glabrescens</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.44	insig_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. insignis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	insig_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. insignis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	insig_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. insignis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	insig_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. insignis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	insig_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. insignis</i> .
Fig.45	insig_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. insignis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	insig_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. insignis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.46	macdo_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. macdougalli</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	macdo_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. macdougalli</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	macdo_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. macdougalli</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	macdo_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. macdougalli</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	macdo_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. macdougalli</i> .
Fig.47	macdo_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. macdougalli</i> .
	macdo_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. macdougalli</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
Fig.48	marti_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. martinezii</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080. Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4

	marti_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. martinezii</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	marti_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. martinezii</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	marti_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. martinezii</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	marti_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. martinezii</i> .
Fig.49	marti_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. martinezii</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	marti_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. martinezii</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.50	purul_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. purulhana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	purul_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. purulhana</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	purul_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. purulhana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	purul_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. purulhana</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	purul_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. purulhana</i> .
Fig.51	purul_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. martinezii</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	purul_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. martinezii</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.52	sego_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. segoviensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	sego_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. segoviensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	sego_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. segoviensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	sego_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. segoviensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	sego_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. segoviensis</i> .
Fig.53	sego_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. segoviensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	sego_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. segoviensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.54	subs_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. subspathulata</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.

	subs_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. subspathulata</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	subs_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. subspathulata</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	subs_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. subspathulata</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	subs_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. subspathulata</i> .
Fig.55	subs_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. subspathulata</i> . Rojo=Presente; Verde=P1; Azul=P3
	subs_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. subspathulata</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Fig.56	cedro_P1	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. cedrosensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 4.5 para el año 2080.
	cedro_P2	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. cedrosensis</i> bajo el escenario MIROC5 y RCP 8.5 para el año 2080.
	cedro_P3	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. cedrosensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 4.5 para el año 2080.
	cedro_P4	Distribución del nicho ecológico de la especie <i>Q. cedrosensis</i> bajo el escenario MPI-ESM-LR y RCP 8.5 para el año 2080.
	cedro_present	Distribución actual del nicho ecológico de la especie <i>Q. cedrosensis</i> .
Fig.57	cedro_45	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 4.5 de la especie <i>Q. cedrosensis</i> . Rojo=P1; Verde=P3; Azul=Presente
	cedro_85	Multibandas comparativo para las proyecciones con RCP 8.5 de la especie <i>Q. cedrosensis</i> . Rojo=Presente; Verde=P2; Azul=P4
Tabla 1	ANP (Hoja 1)	Comparativa del tamaño de áreas con idoneidad ambiental para el establecimiento de 1 o más encinos amenazados dentro de las Áreas Naturales Protegidas (presente vs. proyecciones).
Tabla 2	ANP (Hoja 2)	Comparativa del tamaño de áreas consideradas como centros de diversidad de encinos amenazados dentro de las Áreas Naturales Protegidas (presente vs. proyecciones).