



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

**EFEECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE
CINCO ESPECIES ARBÓREAS DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

ERICK EDUARDO GUTIÉRREZ ESTRADA

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS:
DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**

**COMITÉ TUTORAL:
DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA,
UNAM
DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER, INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM**

MÉXICO, D.F.

ABRIL, 2014



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
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

**EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE
CINCO ESPECIES ARBÓREAS DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

ERICK EDUARDO GUTIÉRREZ ESTRADA

**TUTORA PRINCIPAL DE TESIS:
DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM**

**COMITÉ TUTORAL:
DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA,
UNAM
DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER, INSTITUTO DE BIOLOGÍA, UNAM**

MÉXICO, D.F.

ABRIL, 2014



Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión del subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas, celebrada el día 30 de septiembre del 2013, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS** del alumno **GUTIÉRREZ ESTRADA ERICK EDUARDO** con número de cuenta **303248749** con la tesis titulada **"EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISTRIBUCIÓN DE CINCO ESPECIES ARBÓREAS DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO"**, realizada bajo la dirección de la **DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ**:

Presidente: DR. OCTAVIO RAFAEL ROJAS SOTO
Vocal: DRA. MARÍA DEL LOURDES VILLERS RUÍZ
Secretario: DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
Suplente: DRA. SUSANA VALENCIA ÁVALOS
Suplente: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MEYER

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 12 de marzo de 2014.

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente del interesado

AGRADECIMIENTOS

- Al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada con número de becario 262592.
- Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por la beca de término de estudios otorgada dentro del proyecto con clave IN300312.
- Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado, PAEP por el apoyo otorgado para la asistencia al IV Congreso de Ecología.
- A los miembros del Comité Tutor (Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez, Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, Dr. Enrique Martínez Meyer) por las aportaciones y comentarios realizados durante todo el transcurso de la elaboración del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL

- A mi tutora la Dra. Rosa Irma Trejo Vázquez por sus aportaciones y dirección que le fue dando al presente trabajo. Porque sus enseñanzas tanto profesionales como personales han forjado en mí el gusto por la ciencia.
- A los miembros del jurado revisor de la tesis (Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, Dr. Enrique Martínez Meyer, Dr. Octavio Rafael Rojas Soto, Dra. Susana Valencia Ávalos, Dra. María del Lourdes Villers Ruíz) por los comentarios realizados al presente estudio.
- A mis profesores de las asignaturas de la maestría, porque sus enseñanzas me permitieron dar aportaciones que fueron la base para el método desarrollado en la tesis.
- A Tania Fernández por las asesorías y facilidades brindadas en cuanto al manejo de SIG.
- A mi toda familia, en especial a mis abuelos (Susana y Rafael) por seguir apoyándome en mi desarrollo profesional.
- A tod@s mis amig@s, en especial a Mónica y Paula por soportar todas las vicisitudes que me ocurrieron durante la elaboración del trabajo.
- Y sobre todo gracias a ti Nihaib, que sabes muy bien que eres la motivación en mi vida y haces que siga adelante frente a las adversidades. Gracias por todo.

ÍNDICE

Resumen	6
Abstract	7
1. Introducción	8
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo general	9
2.2 Objetivos particulares.....	9
3. Justificación.....	9
4. Antecedentes	10
4.1 Oaxaca y su relevancia forestal	10
4.2 Clima y distribución de especies	11
4.3 Modelos de distribución de especies	11
4.4 Cambio climático y su efecto sobre las especies arbóreas	12
4.5 Estudios de los efectos del cambio climático sobre los sistemas forestales en México	14
5. Hipótesis.....	14
6. Método	15
6.1 Selección de especies	15
6.2 Capas ambientales	17
6.2.1 Cartografía digital recopilada.....	17
6.2.2 Cartografía digital elaborada.....	19
6.3 Modelado de la distribución y validación de los modelos	20
6.4 Condiciones preferenciales de las especies	27
6.5 Evaluación de la sensibilidad al cambio climático.....	28
7. Resultados	30
7.1 <i>Pinus ayacahuite</i>	30
7.2 <i>Pinus montezumae</i>	35
7.3 <i>Pinus oocarpa</i>	40
7.4 <i>Quercus candicans</i>	45
7.5 <i>Quercus uxoris</i>	50
8. Discusión.....	55
9. Conclusiones	63
10. Literatura consultada.....	64

Anexo 1	72
Anexo 2	76
Anexo 3	80
Anexo 4	84
Anexo 5	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especies seleccionadas	17
Tabla 2. Tipos de clima.	20
Tabla 3. Tipos de análisis	21
Tabla 4. Matriz de confusión.....	21
Tabla 5. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos de presencia y ausencia.	25
Tabla 6. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos abundancia	26
Tabla 7. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos de presencia.....	27

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Índice Kappa	22
Fórmula 2. Índice TSS.....	22
Fórmula 3. Índice Sn	22
Fórmula 4. Índice Sp	23
Fórmula 5. Índice CCI.....	23
Fórmula 6. Función de enlace y su inverso para la regresión logística binaria.....	24
Fórmula 7. Función de enlace y su inverso tipo Poisson	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de <i>P. ayacahuite</i>	31
--	----

Figura 2. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de <i>P. ayacahuite</i>	32
Figura 3. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para <i>P. ayacahuite</i>	34
Figura 4. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de <i>P. montezumae</i>	36
Figura 5. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de <i>P. montezumae</i>	37
Figura 6. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para <i>P. montezumae</i>	39
Figura 7. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de <i>P. oocarpa</i>	41
Figura 8. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de <i>P. oocarpa</i>	42
Figura 9. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para <i>P. oocarpa</i>	44
Figura 10. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de <i>Q. candicans</i>	46
Figura 11. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de <i>Q. candicans</i>	47
Figura 12. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para <i>Q. candicans</i>	49
Figura 13. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de <i>Q. uxoris</i>	51
Figura 14. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de <i>Q. uxoris</i>	52
Figura 15. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para <i>Q. uxoris</i>	54

RESUMEN

En este estudio se evalúa el posible impacto del cambio climático sobre las áreas de distribución potencial de cinco especies arbóreas en el estado de Oaxaca, México. Se obtuvieron las áreas de distribución de las especies a partir de métodos estadísticos y se evaluó las modificaciones en dichas áreas por el efecto del cambio climático utilizando proyecciones de cambio. El modelado de las áreas se realizó a partir de distintas capas climáticas y con tres tipos de datos: presencia; abundancia; presencia y ausencia, lo que permitió hacer comparaciones entre las diferentes técnicas de modelado así como también de las capas ambientales. Los resultados obtenidos muestran que no hay un tipo de datos o una técnica de modelado que se aplique para todas las especies, ya que algunas se ajustan mejor a los modelos basados en datos de presencia, tal es el caso de *Pinus oocarpa* ($S_n = 0.750$). Para *P. ayacahuite* todos los modelos resultaron tener un buen desempeño por sus valores de sensibilidad cercanos a uno, caso contrario con *P. montezumae*, donde todos los modelos presentaron un mal desempeño por sus valores de sensibilidad cercanos a cero. *Quercus candicans* se modela mejor a partir de datos de presencia y presencia-ausencia ($S_n > 0.7$). *Q. uxoris* se modela mejor con datos de presencia-ausencia, obteniendo valores de sensibilidad iguales a 0.75 y con valores de especificidad mayores a 0.89. De acuerdo a las proyecciones de cambio climático, para *P. ayacahuite* se proyectan disminuciones en sus áreas de distribución potencial de hasta un 97.2%, mientras que en especies como *P. oocarpa* se proyectan disminuciones de hasta un 76.5%. Se concluye que las especies de distribución restringida (*P. ayacahuite*, *Q. uxoris*) son más sensibles al cambio climático, en comparación con las especies de amplia distribución (*P. oocarpa*, *Q. candicans*).

Palabras claves: cambio climático, distribución restringida, *Pinus*, *Quercus*, tipo de clima.

ABSTRACT

This study evaluates the potential impact of climate change on distribution areas of five tree species in the state of Oaxaca, Mexico. We obtained the distribution areas of the species based on statistical methods and assessed the sensitivity of these areas to the effect of climate change. The modeling of the distribution areas was made from different climatic layers and with three types of data: presence, abundance, presence and absence, which allowed us to make comparisons between the different modeling techniques as well as of environmental layers. The results showed that there is not a data type or modeling technique that is applied to all species, since, for example some models are better suited using the presence data, which is the case of *Pinus oocarpa* ($S_n = 0.750$). For *P. ayacahuite*, all models proved to be a good performance by their sensitivity values close to one, in contrast, for *P. montezumae* all models prove to be a bad performance, considering their sensitivity values, because all are close to zero. For *Quercus candicans* the best models were obtained from presence and presence-absence data ($S_n > 0.7$). In the case of *Q. uxoris*, the best models were obtained from presence-absence data, with sensitivity values equal to 0.75 and with specificity values higher than 0.89. According to climatic change projections for example *P. ayacahuite* projects decreases in its distribution areas up 97.2%, while in species such *P. oocarpa*, projects decreases in its distribution areas up 76.5%. It is concluded that the restricted range species (*P. ayacahuite*, *Q. uxoris*) are more sensitive to climate change, compared with widespread species (*P. oocarpa*, *Q. candicans*).

Keywords: climate change, *Pinus*, *Quercus*, restricted distribution, climate type.

1. INTRODUCCIÓN

La modelación de la distribución de las especies puede proveer información de sus requerimientos ecológicos, así como también de su presencia en lugares donde no se cuenta con esos datos, particularmente considerando que las áreas de distribución de las especies pueden predecirse con base en información climática. De esta manera, es posible producir modelos predictivos con cierto grado de incertidumbre sobre los patrones de distribución de las especies (Peterson, 2001; Peterson et al., 2002; Zaniwski, Lehmann y Overton, 2002).

El clima es uno de los factores más importantes en la determinación de muchas funciones de los ecosistemas y juega un papel fundamental en la distribución de las especies que los componen, ya que actúa a gran escala. Por ello, debido a la estrecha relación clima-vegetación, se pueden estimar los efectos del cambio climático sobre las comunidades vegetales (Hardy, 2003; Zunino y Zullini, 2003; Woodall et al., 2009; Bai et al., 2011).

El cambio climático pondrá a prueba la permanencia de las especies, ya que si bien algunas por sus características genéticas, serán capaces de afrontar los cambios ambientales, para otras el cambio climático excederá su habilidad de dispersarse o de sobrevivir a través de la aclimatación a nuevas condiciones (Peterson et al., 2005); esto llevará a la alteración del hábitat y dará como resultado la reducción en sus áreas de distribución y en sus poblaciones, lo que conllevaría eventualmente a extinciones locales (Smith, 1997).

No es suficiente la información existente de las tolerancias ambientales y de los efectos del cambio climático sobre las especies, específicamente de las especies forestales en México. Por ello, es de gran importancia conocer dichas las tolerancias así como también contar con estudios de los cambios climáticos regionales relevantes para las especies (Bolliger et al., 2000; Dobbertin et al., 2005; Engler et al., 2009; Hsu et al., 2011; Rojas-Soto et al., 2012). Estas investigaciones pueden ser empleadas en diferentes ámbitos, desde planes de

manejo hasta programas de conservación y estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático (Innes, 1994; IPCC, 2001, 2007b; Villers y Trejo, 2004; Trejo et al., 2011).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto del cambio climático sobre las áreas de distribución potencial actual de cinco especies arbóreas con afinidades templadas del estado de Oaxaca, México.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Aplicar métodos estadísticos que permitan describir las probabilidades de ocurrencia de las especies en las condiciones ambientales en las que se desarrollan.
- Identificar las áreas de distribución potencial de las especies seleccionadas.
- Comparar si los modelos de distribución de las especies seleccionadas varían con el mismo tipo de datos de colecta, así como también el mismo tipo de capas climáticas.
- Evaluar la sensibilidad de las especies seleccionadas al cambio climático, en términos de sus áreas de distribución.

3. JUSTIFICACIÓN

El conocer las afinidades y patrones de comportamiento de las especies con relación a las condiciones climáticas, tiene repercusiones prácticas importantes, esencialmente en el manejo y conservación de los recursos vegetales. Para conocer dichas afinidades y patrones se aplicaron técnicas estadísticas para calcular la probabilidad de establecimiento de las especies en condiciones ambientales dadas, considerando tanto los datos presencia de las especies, como también los datos de abundancia y ausencia, además de distintas capas climáticas.

4. ANTECEDENTES

4.1 OAXACA Y SU RELEVANCIA FORESTAL

El estado de Oaxaca se encuentra ubicado en la porción meridional de la república mexicana, limita al norte con Veracruz y Puebla, al este con Chiapas, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Guerrero. Las coordenadas extremas del estado son: al norte 18° 40' y al sur 15°39' de latitud norte; al este 93° 52' y al oeste 98° 33' de longitud oeste. Por su extensión ocupa el quinto lugar en el país, después de los estados de Chihuahua, Sonora, Coahuila y Durango. (García-Mendoza et al., 2004; INEGI, 2011).

Además de su amplia extensión territorial, Oaxaca se caracteriza por su enorme diversidad cultural, geológica, climática y biológica. Esto está determinado por varios factores entre los que se encuentran su posición geográfica y su relieve (Trejo, 2004). Específicamente, en el caso de la diversidad biológica de plantas, para el estado se han reportado 9,362 especies, que representa más del 40% de la flora vascular de México. De todas las especies reportadas, 17 pertenecen al género *Pinus* y 50 al género *Quercus* (García-Mendoza et al., 2004; García-Mendoza y Meave, 2011).

Oaxaca es uno de los estados con mayor diversidad de pinos y encinos, ya que éstos prosperan prácticamente en todas las regiones del estado y su distribución estaría asociada a diversos factores como el tipo de suelo y el clima. Además de sus amplias distribuciones, los *Pinus* y *Quercus* son los géneros que mayor volumen de madera aportan al estado, este dato es muy relevante si consideramos que Oaxaca aporta el 7.1% de la producción nacional forestal maderable (Del Castillo et al., 2004; SEMARNAT-INECC, 2012).

4.2 CLIMA Y DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES

La distribución geográfica de una especie está determinada por tres grupos de factores que operan a diferentes escalas e intensidades; uno de ellos son los factores abióticos o ambientales, el otro corresponde con sus habilidades de colonización u ocupación de áreas (accesibilidad) y por último por factores bióticos, tales como las interacciones ecológicas. De los factores ambientales, el clima, la orientación de la ladera y el tipo de suelo son de los más importantes para la determinación de la distribución de las especies arbóreas. Esto se debe principalmente a que las especies responden a gradientes ambientales (límites de tolerancia) y a recursos existentes (Soberón y Peterson, 2005; Austin, 2007; Ashcroft et al., 2012; Barvea et al., 2011; Stanton-Geddes et al., 2012).

El clima influye en casi cada aspecto del ecosistema, desde las respuestas fisiológicas de los organismos hasta la productividad y la circulación de los nutrientes. Particularmente en las especies arbóreas, regula el crecimiento y determina la presencia o ausencia de la especie, así como también los límites de distribución por la combinación de variables climáticas, asumiendo a su vez, que estos límites se modifican a través del tiempo en sincronía con los cambios en el clima (Araújo y Peterson, 2012; Puhe y Ulrich, 2001; Smith y Smith, 2007).

4.3 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES

Si se parte de la idea de que la distribución de las especies está determinada primeramente por variables ambientales, sería posible predecir su distribución en función de algunas variables climáticas. A las predicciones se les puede llamar modelos de distribución de especies cuando se hace énfasis en la distribución geográfica o modelos de nicho ecológico cuando se hace énfasis en los requerimientos de nicho de la especie (Austin, 2007; Stankowski y Parker, 2011; Saupe et al., 2012; Stanton-Geddes et al., 2012).

Los modelos de distribución de especies utilizan la asociación entre aspectos climáticos y la ocurrencia conocida de las especies en el área de interés, en la que se definen condiciones óptimas en las cuales las especies pueden tener poblaciones viables. Es decir, son métodos que se basan en encontrar regiones en el espacio con condiciones ambientales, que en el sentido matemático, reúnan las condiciones similares a los sitios donde se observan las especies (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011; Araújo y Peterson, 2012; Saupe et al., 2012).

Además del clima, existen otros factores que limitan la distribución y que son pocas veces considerados debido a que se carece de dicha información, ejemplo de esto son los factores biológicos como las interacciones bióticas, la capacidad de dispersión, la longevidad de las especies así como otras características de su ciclo de vida (Stankowski y Parker, 2010, 2011; Ashcroft et al., 2012; Meineri et al., 2012; Stanton-Geddes et al., 2012).

Los modelos de distribución de especies están en pleno desarrollo y existe una gran variedad de ellos. Entre los modelos estadísticos más utilizados están los Modelos Lineales Generalizados (GLM), los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) y programas como Maxent (Guisan et al., 2002; Zaniwski et al., 2002; Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011; Mateo et al., 2011).

4.4 CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO SOBRE LAS ESPECIES

ARBÓREAS

De acuerdo al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2012), el cambio climático es considerado como un cambio en el estado de clima que puede ser identificado por los cambios en el valor medio de sus propiedades y/o por la variabilidad de las mismas, que persiste por largos periodos, generalmente decenio o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos, a forzamiento externos o a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra.

Dado que el cambio climático actual está determinado principalmente por causas antropogénicas, se han desarrollado modelos de circulación general, para ayudar a determinar cómo pueden influir las concentraciones crecientes de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en los patrones del clima global a gran escala, ya que las emisiones mundiales GEI por las actividades humanas han aumentado en un 70% desde la era preindustrial (IPCC, 2007a). Para proyectar las posibles tendencias en el futuro, se han generado diversos escenarios del comportamiento de las emisiones. En general estos escenarios suponen un aumento en el futuro; sin embargo, la principal diferencia radica en la velocidad y la magnitud del incremento. Estos escenarios de emisiones son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y hay que aclarar que hasta ahora, todos los propuestos por el IPCC, a ninguno se le ha asignado niveles de probabilidad (Nakicenovic et al., 2000; Smith y Smith, 2007).

El cambio climático tendrá diversos efectos directos e indirectos sobre las especies. Ejemplos de efectos directos serían la alteración en las interacciones bióticas, sensibilidad a plagas, enfermedades o incendios y cambios en su distribución. Un efecto indirecto sobre las especies sería los cambios en la descomposición y circulación de los nutrientes, ya que en los ecosistemas terrestres, estos procesos dependen principalmente de la temperatura y de la humedad (Ciesla, 1995; Smith y Smith, 2007; Martin y Maron, 2012).

Las especies arbóreas frente al cambio ambiental pueden tener diferentes respuestas: migrar hacia condiciones óptimas, adaptarse a las nuevas condiciones y, la más drástica, extinguirse local o completamente. Esto se debe a que algunas especies pueden responder de manera extrema a los cambios ambientales y otras pueden ser menos sensibles y sobrevivir sin serios cambios fisiológicos y/o estructurales. Estas diferencias se deben a que cada especie

presenta diferente fecundidad, mecanismos de dispersión y barreras de dispersión (Peters, 1990; Ciesla, 1995; Oltchev et al., 1999; Aitken et al., 2007).

4.5 ESTUDIOS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS SISTEMAS FORESTALES EN MÉXICO

Las predicciones en el cambio de la vegetación se basan en la premisa de que los distintos tipos de vegetación que se reconocen en la actualidad se relacionan íntimamente con las condiciones climáticas en las que se distribuyen. De acuerdo a las investigaciones previas, se ha encontrado que los tipos de vegetación que tendrían mayor impacto serían los bosques templados y semicálidos, en donde las áreas de distribución actual tenderían a disminuir al incrementarse la temperatura. Se espera que del 13 al 60% de los bosques templados se verán afectados, esto de acuerdo a diferentes Modelos de Circulación General y escenarios de emisiones (Villers y Trejo, 1997, 1998, 2000, 2004; Trejo et al., 2011).

Específicamente de los bosques templados, son los bosques de coníferas y de encinos los que se verían más afectados por el cambio climático, ya que se prevee un decremento de los climas templados con remplazo hacia climas más secos y cálidos. De los bosques de coníferas, se reporta una pérdida de hasta un 41% en su área de distribución para el 2050, mientras que para las latifoliadas se reporta una disminución en su área entre el 4 al 18% (Villers y Trejo, 1998; Villers et al., 2006; Trejo et al., 2011).

5. HIPÓTESIS

De acuerdo a su intervalo de tolerancia ante las condiciones ambientales, una especie será más abundante en los sitios en donde las condiciones sean favorables para su desarrollo. La presencia de pocos individuos en un sitio representará entonces las condiciones extremas en las que la especie puede presentarse, por encima de dichas condiciones una determinada

especie no puede establecerse porque excedería su grado de tolerancia. Si las condiciones climáticas cambian, entonces las especies con intervalos de tolerancia más amplios (especies de amplia distribución) serán capaces de enfrentar los cambios, en contraste con las especies con intervalos restringidos que serían más sensibles (especies de distribución restringida).

6. MÉTODO

Para cumplir con los primeros tres objetivos particulares del presente trabajo, es decir, obtener las áreas de distribución de las especies a partir de métodos estadísticos e identificar qué tipos de datos de colecta y qué tipos de capas climáticas se acoplan mejor al modelado de la distribución de cada especie, se realizó lo siguiente:

6.1 SELECCIÓN DE ESPECIES

Se realizó la selección de especies arbóreas de ambientes templados de acuerdo a criterios de abundancia y distribución. El tipo de distribución (amplia y restringida) para el estado de Oaxaca se basó principalmente en la descripción de la especie en la literatura que define a cada una de las ellas. El siguiente criterio fue la cantidad de datos de los registros en las diferentes bases de datos (CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, <http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remibnodosdb.html>; GBIF, Global Biodiversity Information Facility, <http://www.gbif.org/>; UNIBIO, Unidad de Informática para la Biodiversidad del Instituto de Biología, UNAM, <http://www.unibio.unam.mx/>) y de la información proveniente del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2004-2009 (INFyS). Los muestreos realizados en el INFyS 2004-2009 corresponden a un muestreo estratificado sistemático por conglomerado. Para el diseño del muestro y la distribución de los conglomerados (Unidades de Muestreo Primarias) dividieron al país en regiones cuadrangulares (paneles de 5 x 5 kilómetros), esta estrategia les permitió obtener una

distribución espacial, regular y consistente del total de conglomerados sobre el territorio nacional. Cada conglomerado está integrado por cuatro unidades de muestreo (Unidades de Muestreo Secundarias) y la equidistancia entre cada conglomerado es de 5 x 5 km para los bosques de coníferas, coníferas-latifoliadas, latifoliadas y bosque mesófilo. Cada conglomerado corresponde a una parcela circular de una hectárea (56.42 m de radio) y la separación entre el centro de cada unidad de muestro secundaria es de 45.14 m. Con esta información se obtuvieron datos de la presencia, ausencia y abundancia así como la ubicación geográfica de cada registro. Se hizo una selección de los registros correspondientes al estado de Oaxaca, que es el sitio de estudio de este trabajo. Se realizó una depuración de los datos provenientes de las bases disponibles, por lo que se elaboró una rejilla de aproximadamente 926 metros de resolución, para que de esta manera existiera un punto por pixel y así evitar la correlación espacial. Para el caso de datos de abundancia, únicamente se utilizaron los datos provenientes del INFyS 2004-2009, que contiene información de la abundancia de las especies en los muestreos realizados por la CONAFOR. En la Tabla 1 se muestra las especies seleccionadas y su importancia, así como también su tipo de distribución y el número de datos de presencia y abundancia para cada una.

Tabla 1. Especies seleccionadas

Espece	Tipo de distribución	Numero de datos de presencia	Abundancia	Importancia
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schlttdl.	Restringida	39	106	Habita regularmente lugares muy específicos, como lomas y cañadas templadas y muy húmedas. Se utiliza para la reforestación y para el estado su madera es de importancia comercial ya que es más cara que la de otros pinos (Del Castillo et al., 2004; Ortíz-Medrano et al., 2008; CONAFOR, 2012).
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	Restringida	46	468	Se utiliza para reforestación, ya que puede llegar a establecerse en sitios con condiciones de alta montaña hasta sitios secos o áridos, aunque con crecimiento lento y con árboles de baja estatura, además presenta corteza gruesa por lo que es resistente a incendios (CABI, 2002; CONAFOR, 2012).
<i>Quercus uxoris</i> McVaugh	Restringida	16	91	Especie endémica para México, porque sólo se llega a localizar en los estados de Colima, Guerrero, Jalisco, Chiapas y Oaxaca (Valencia y Nixon, 2004; Romero, 2006; Arizaga et al., 2009).
<i>Quercus candicans</i> Née	Amplia	139	2194	Es de amplia distribución en el estado, pero no cuenta con algún programa de manejo para su aprovechamiento (Valencia y Nixon, 2004; Arizaga et al., 2009)
<i>Pinus oocarpa</i> Scheide	Amplia	221	2669	Es la productora primaria de resina de pino en México y presenta conos seróticos, los cuales los hace resistentes a incendios (Del Castillo et al., 2004; CONAFOR, 2012).

6.2 CAPAS AMBIENTALES

Para incorporar las variables ambientales en los modelos de distribución, se hizo una búsqueda de información cartográfica, que representaran la distribución espacial de los datos y que estuvieran disponibles.

6.2.1 CARTOGRAFÍA DIGITAL RECOPIADA

- Parámetros bioclimáticos: este conjunto de mapas toman en cuenta datos que van del año 1902 al año 2011, con una resolución espacial de aproximadamente 926 metros y provienen del Atlas Climático Digital de México versión 2.0, elaborados por el Centro de Ciencias de la Atmosfera UNAM (Fernández-Eguiarte et al., 2012). Dichos parámetros son:

1. Temperatura media anual (°C)
2. Rango de temperatura media diurna (media mensual de (temp. máxima – temp. mínima))
3. Isotermalidad. Índice de variabilidad de la temperatura $(P2/P7)*100$ (Razón del rango diurno promedio con respecto al rango anual)
4. Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
5. Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
6. Temperatura mínima del mes más frío (°C)
7. Rango de temperatura anual (°C) (temp. máx. del mes más cálido – temp. Mín. del mes más frío)
8. Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
9. Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
10. Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
11. Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
12. Precipitación anual (mm)
13. Precipitación del mes más lluvioso (mm)
14. Precipitación del mes más seco (mm)
15. Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
16. Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
17. Precipitación del trimestre más seco (mm)
18. Precipitación del trimestre más cálido (mm)
19. Precipitación del trimestre más frío (mm)

- Modelo Digital de Elevación: el mapa de elevaciones proviene del modelo digital de elevación del WorldClim (<http://www.worldclim.org/>) y tiene una resolución espacial de aproximadamente 926 metros.
- Tipos de suelo de la Serie II elaborado por el INEGI, el cual se transformó a formato raster por medio de un SIG a una resolución espacial de aproximadamente 926 metros.

6.2.2 CARTOGRAFÍA DIGITAL ELABORADA

Se elaboró el mapa de tipos de climas para el estado, el cual se obtuvo a partir de los datos mensuales de temperatura media y de precipitación (Atlas Climático Digital de México, Fernández-Eguiarte et al., 2012) y se realizó la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004). Los datos se calcularon para cada píxel (~926 m) y para facilitar el análisis se utilizó una reclasificación de los tipos climáticos que considera el tipo de clima, el régimen de lluvias y la humedad (Trejo, comentario personal). La combinación de los elementos climáticos como la temperatura, la cantidad de lluvia que se deposita en un área, así como sus patrones a lo largo del año, da como resultado los tipos de clima (Trejo, 2004). En la Tabla 2 se muestran todos los tipos de climas que se consideraron en el presente estudio.

Tabla 2. Tipos de clima: (v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja.

Tipos de clima
Cálido húmedo (v)
Cálido subhúmedo (v)2
Cálido subhúmedo (v)1
Cálido subhúmedo (v)0
Semicálido húmedo (v)
Semicálido húmedo (i)
Semicálido subhúmedo (v)2
Semicálido subhúmedo (v)1
Semicálido subhúmedo (v)0
Templado húmedo (v)
Templado húmedo (i)
Templado subhúmedo (v)2
Templado subhúmedo (v)1
Templado subhúmedo (v)0
Semiárido cálido (v)
Semiárido semicálido (v)
Semiárido templado (v)
Árido cálido (v)
Árido semicálido (v)
Árido templado (v)
Muy árido cálido (v)
Muy árido semicálido (v)
Muy árido templado (v)

6.3 MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS

MODELOS

Para el modelado de la distribución de las especies se utilizaron los datos de presencia-abundancia-ausencia de los sitios de muestro generados en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2004-2009) de la CONAFOR, el cual cuenta con 2172 unidades de muestreo

primarias (conglomerados) para el estado de Oaxaca. Dada la naturaleza de los datos generados por el inventario, para el modelado se consideró como datos de presencia a las unidades de muestreo donde la especie tiene registro de presencia, los datos de abundancia corresponden al número de individuos de la misma especie presentes en cada unidad de muestreo y los datos de ausencia corresponden a todas aquellas unidades de muestreo donde la especie no tiene registro de presencia.

Se realizaron dos análisis que se diferencian por el tipo de variables que se utilizan para el modelado, específicamente las variables climáticas. Para el análisis 1 se modeló con la capa de tipos de clima y para el análisis 2 se modeló con los parámetros bioclimáticos. Esto se realizó para identificar qué tipo de variables climáticas se acoplan mejor para el modelado de la distribución de las especies. Las variables utilizadas para cada análisis se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de análisis

Análisis 1	Análisis 2
Tipo de clima	Parámetros bioclimáticos
Tipo de suelo	Tipo de suelo
Altitud	Altitud

Para la validación de los modelos se utilizaron los datos de presencia de las bases biológicas ya mencionadas y los datos de ausencia de las especies que provienen del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2004-2009). La evaluación del desempeño de los modelos se estimó por medio del cálculo de varios índices que se obtienen a partir de una matriz de confusión (Tabla 4):

Tabla 4. Matriz de confusión

	Modelo predicho presente	Modelo predicho ausente
Punto real presente	Presencia verdadera (a)	Error de omisión (c)
Punto real ausente	Error de comisión (b)	Ausencia verdadera (d)

Donde: (a) es el número de puntos de presencia de la especie que caen en el área que predice presencia el modelo obtenido; (b) es el número de puntos de ausencia que caen en el área que predice presencia el modelo; (c) es el número de puntos de presencia que caen en el área que predice ausencia el modelo obtenido; (d) es el número de puntos de ausencia que caen en el área que predice ausencia el modelo resultante. Los índices calculados se describen a continuación:

- *Índice Kappa de Cohen* (Cohen, 1960; Liu et al., 2005; Mouton et al., 2010): el cual da como resultado valores que van desde 0 a 1, siendo los mejores modelos aquellos que obtienen valores más cercanos a 1 y cuya fórmula es:

Fórmula 1. Índice Kappa

$$Kappa = \frac{\left[\frac{(a+d)}{n} - \left(\frac{(a+c)(a+b) + (b+d)(c+d)}{n^2} \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{(a+c)(a+b) + (b+d)(c+d)}{n^2} \right) \right]}$$

- *Índice TSS, True Skill Statistics; Estadística de habilidades verdaderas* (Allouche et al., 2006; Mouton et al., 2010): con este índice se obtienen valores que van desde -1 a 1, siendo los mejores modelos aquellos con puntuaciones más cercanas a 1. La fórmula para calcularlo se muestra a continuación:

Fórmula 2. Índice TSS

$$TSS = \frac{(ad) - (bc)}{(a+c)(b+d)} = Sn + Sp - 1$$

- *Sensibilidad, Sn* (Forbes, 1995; Liu et al., 2005; Mouton et al., 2010): se refiere a la proporción de puntos de presencia de la especie que caen en el área que predice presencia en el modelo obtenido. Los valores que se pueden llegar a obtener van desde 0 a 1. Los mejores modelos son aquellos con valores cercanos a 1.

Fórmula 3. Índice Sn

$$Sn = \frac{a}{a+c}$$

- *Especificidad, Sp* (Forbes, 1995; Liu et al., 2005; Mouton et al., 2010): se refiere a la proporción de puntos de ausencia que caen en el área que predice ausencia el modelo. Los valores van de 0 a 1 y los mejores modelos acercan su valor a 1.

Fórmula 4. Índice Sp

$$Sp = \frac{d}{b + d}$$

- *Índice CCI, Correctly Classified Instances; Casos Clasificados Correctamente* (Buckland y Elston, 1993; Fielding y Bell, 1997; Mouton et al., 2010): se refiere a la proporción de puntos de presencia y ausencia que caen en las áreas esperadas de presencia y ausencia que predice el modelo. Los valores también van de 0 a 1, con el mejor cercano a 1.

Fórmula 5. Índice CCI

$$CCI = \frac{a + d}{n}$$

Hay índices que toman en cuenta tanto los datos de presencia como los datos de ausencia de la matriz de confusión, tal es el caso del índice Kappa, TSS y CCI. Por el contrario, hay índices que sólo utilizan algunas partes de la matriz de confusión, como el índice de sensibilidad que sólo toma en cuenta los datos de presencia o el índice de especificidad que sólo considera los datos de ausencia (Liu et al., 2005; Austin, 2007).

Para cada tipo de análisis se realizaron tres procesos de modelado que se diferencian por los tipos de datos de colecta. A continuación se hace una descripción de cada uno de los procesos de modelado y la validación de cada uno:

- **DATOS DE PRESENCIA Y AUSENCIA.** Para el modelado de este tipo de datos se realizó un modelo lineal generalizado del tipo regresión logística binaria [0, ausencia; 1, presencia] (Fórmula 6) con función de enlace “logit” y cuyo inverso da como

resultado la probabilidad (p) de presencia de la especie. Esto se realizó calculando los coeficientes del modelo lineal con el programa IBM SPSS Statistics versión 19 (IBM Corp., 2010) y con los valores de dichos coeficientes se generó la fórmula del modelo lineal. En este tipo de modelado se utilizó el 100% de los datos de presencia y el 75% de datos aleatorios de ausencia, por lo que se realizaron cien modelos lineales. Al final de este proceso se seleccionó la fórmula del modelo lineal con los valores más significativos. Posteriormente se colocó la fórmula seleccionada en la función de *Raster calculator* del programa ArcMap 10 (ESRI, 2010) para obtener el mapa de probabilidades de presencia de la especie. El mapa de presencia se generó a partir del corte de probabilidades de tal manera que se consideraran áreas donde se obtuviera sólo el 10% de omisión de puntos de modelado, el corte de probabilidades se realizó por medio del programa ArcMap 10 (ESRI, 2010).

Fórmula 6. Función de enlace y su inverso para la regresión logística binaria

Función de enlace	Inversa de la función
$y' = \ln\left(\frac{y}{1-y}\right)$	$p = \frac{e^{y'}}{1 + e^{y'}}$

La validación de los modelos provenientes de este proceso de modelado se realizó con los datos de presencia de las bases disponibles y con el resto de las ausencias que no se utilizaron en el modelado (25%). En la Tabla 5 se presentan las especies seleccionadas y el número de datos con los que cuentan cada una para modelar y validar.

Tabla 5. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos de presencia y ausencia.

Especie	Modelado		Validación	
	Presencia	Ausencia (75%)	Presencia	Ausencia (25%)
<i>P. ayacahuite</i>	18	1615	21	539
<i>P. montezumae</i>	36	1602	10	534
<i>P. oocarpa</i>	203	1476	18	493
<i>Q. candicans</i>	107	1548	32	517
<i>Q. uxoris</i>	11	1620	5	541

- DATOS DE ABUNDANCIA.** Para el modelado de este tipo de datos se realizó un modelo lineal generalizado del tipo Poisson [conteos] (Fórmula 7) con función de enlace “log” y cuyo inverso da como resultado el número de individuos (I) de la especie. En este proceso de modelado también se calcularon los coeficientes del modelo lineal con el programa IBM SPSS Statistics versión 19 (IBM Corp., 2010) y con los valores de dichos coeficientes se generó la fórmula del modelo lineal. En este caso, se utilizó el 75% de datos aleatorios de abundancia para modelar, por lo que se realizaron cien modelos lineales y se seleccionó la fórmula del modelo lineal con los valores más significativos. Posteriormente se colocó la fórmula seleccionada en la función de *Raster calculator* del programa ArcMap 10 (ESRI, 2010) para obtener el mapa del número de individuos por pixel. Para fines comparativos entre los diferentes procesos de modelado, a partir del mapa de individuos que se obtuvo, se realizó un mapa de sólo presencia con el programa ArcMap 10 (ESRI, 2010), considerando como áreas de presencia a todos los sitios cuyos valores de abundancia fueran ≥ 1 y las áreas restantes fueron consideradas como áreas de ausencia.

Fórmula 7. Función de enlace y su inverso tipo Poisson

Función de enlace	Inversa de la función
$y \wedge = \log(y)$	$I = \exp^{y \wedge}$

Para los modelos generados a partir de este tipo de datos (abundancia, mapa convertido a presencia), la validación se realizó con los datos de presencia provenientes de las bases disponibles y con el 100% de ausencias. Además, se calculó un índice más para evaluar el desempeño de este tipo de modelos. En este caso se consideró la información de abundancia del mapa de individuos que obtuvo, dichos modelos se validaron con el 25% de datos de abundancia restantes del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2004-2009) de la CONAFOR que no se utilizaron en el modelado de la distribución. Para evaluar el desempeño de los modelos realizados a partir de este tipo de datos se utilizó el coeficiente r ; que se obtiene al comparar los valores de abundancia obtenidos por los modelos y los valores de abundancia de los puntos que se utilizan para validar. El coeficiente de correlación (r) es una medida de asociación entre dos variables y los valores que se obtienen van de -1 a 1, donde los mejores modelos son aquellos con valores cercanos a 1. En la Tabla 6 se presentan las especies seleccionadas y el número de datos con los que cuentan cada una para modelar y validar.

Tabla 6. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos abundancia

Especie	Modelo Abundancia		Modelo Abundancia (transformado a presencia)	
	Modelado (75%)	Validación (25%)	Presencia	Ausencia
<i>P. ayacahuite</i>	14	4	21	2154
<i>P. montezumae</i>	27	9	10	2136
<i>P. oocarpa</i>	152	51	18	1969
<i>Q. candicans</i>	80	27	32	2065
<i>Q. uxoris</i>	7	4	5	2161

- **DATOS DE PRESENCIA.** Para el modelado de este tipo de datos se utilizó el programa Maxent versión 3.3.3 [sólo datos de presencia] (Phillips et al., 2006) y se

modeló con el 100% de los datos de presencia. El resultado es un mapa de probabilidades de las áreas que contienen las condiciones similares a los puntos que se introducen para el modelado. El mapa de presencia se generó a partir del corte de probabilidades de tal manera que se consideraran áreas donde se obtuviera sólo el 10% de omisión de puntos de modelado, el corte de probabilidades se realizó por medio del programa ArcMap 10 (ESRI, 2010).

La validación de los modelos a partir de datos de presencia se realizó con los datos de presencia provenientes de las bases disponibles y con el 100% de ausencias. En la Tabla 7 se presentan las especies seleccionadas y el número de datos con los que cuentan cada una para modelar y validar.

Tabla 7. Número de puntos para modelar y validar por especie para modelos generados a partir de datos de presencia

Especie	Modelado	Validación	
	Presencia	Presencia	Ausencia
<i>P. ayacahuite</i>	18	21	2154
<i>P. montezumae</i>	36	10	2136
<i>P. oocarpa</i>	203	18	1969
<i>Q. candicans</i>	107	32	2065
<i>Q. uxoris</i>	11	5	2161

6.4 CONDICIONES PREFERENCIALES DE LAS ESPECIES

A partir de las áreas de distribución potencial obtenidas por cada modelo por especie, se identificaron sus condiciones ambientales preferenciales. Lo cual se realizó de la siguiente manera: para las variables cualitativas como el tipo de suelo y tipo de clima, se identificaron que categorías se encontraban en las áreas obtenidas; y para las variables cuantitativas como los parámetros bioclimáticos y la altitud, se identificaron los valores mínimos y máximos correspondientes a las áreas obtenidas.

6.5 EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

Para evaluar la sensibilidad al cambio climático de las especies seleccionadas, primero se seleccionaron las proyecciones de cambio disponibles en el Atlas Climático Digital de México elaborados por el Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM (Fernández-Eguiarte et al., 2012). Los modelos de circulación general que se incluyen son el ECHAM5/MPI y el UKHADGEM1. Los escenarios de emisiones corresponden al A2 y B2 y con proyección para el año 2050. Estas proyecciones de cambio se encuentran a una resolución espacial de 30" x 30" y fueron elaborados a partir de los modelos globales de circulación y de escenarios de emisiones del IPCC (Nakicenovic et al., 2000). Los escenarios de tipo A2 describen un mundo muy heterogéneo y sus características distintivas son emisiones altas de gases de efecto invernadero, una población mundial en continuo crecimiento con aproximadamente 15 mil millones de habitantes, debido a que los índices de natalidad entre las regiones convergen muy lentamente, el cambio tecnológico así como el crecimiento económico por habitante son lentos y fragmentados. En el caso de los escenarios de tipo B2 describen un mundo en el que predominan las soluciones locales y regionales a la sostenibilidad económica, social y ambiental por lo que las emisiones de gases de efecto invernadero son menores que en A2, con una población intermedia ya que aumenta a un ritmo menor que en A2 y con un crecimiento económico intermedio (Nakicenovic et al., 2000).

Posterior a la selección de las proyecciones de cambio, se realizaron diversos insumos cartográficos necesarios para la evaluación de la sensibilidad. Se elaboraron los mapas de los tipos de climas bajo las condiciones de cambio climático, estos mapas se realizan a partir de los datos mensuales de temperatura media y de precipitación según las proyecciones de cambio y dichos mapas se encuentran a una resolución aproximada de 926 metros. El proceso de clasificación de clima por pixel, fue el mismo que para el mapa de los tipos de climas bajo

condiciones actuales. También se elaboraron los mapas de los parámetros bioclimáticos bajo las condiciones de cambio climático, estos mapas se realizaron a partir de los datos mensuales de temperatura media y de precipitación bajo las condiciones de cambio climático y se encuentran a una resolución aproximada de 926 metros.

La evaluación de los efectos del cambio climático sobre las áreas de distribución de las especies seleccionadas se realizó dependiendo del tipo de análisis que se elaboró para obtener el modelo de distribución, las consideraciones tomadas para cada tipo de análisis se mencionan a continuación:

- *Cambio en los tipos de climas (Análisis 1).* Con base en las áreas de distribución potencial obtenidas por cada modelo, se elaboraron matrices de cambio según los tipos de clima obtenidos bajo las condiciones actuales y bajo las diferentes proyecciones de cambio climático. De esta manera se puede calcular el porcentaje de cambio de los tipos de clima, por lo que se pueden presentar dos tipos de respuesta, áreas sin cambio y áreas con cambio, es decir, áreas que presentan un clima distinto al tipo de clima actual.
- *Cambios en los intervalos de los parámetros bioclimáticos (Análisis 2).* De acuerdo a las áreas de distribución potencial obtenidas por cada modelo, se calculó su porcentaje de cambio para cada proyección de cambio climático. Al igual que en el caso anterior, sólo puede existir dos tipos de respuestas, áreas sin cambio y áreas con cambio; las áreas sin cambio son todas aquellas que están dentro del valor mínimo y máximo de cada parámetro bioclimático de acuerdo a las condiciones actuales, por el contrario, las áreas con cambio son todas aquellas donde uno o más de un parámetro bioclimático se encuentra fuera del intervalo de valores mínimos y máximo de acuerdo a las condiciones actuales.

7. RESULTADOS

A continuación se describen detalladamente los resultados obtenidos en los análisis de los diferentes tipos de datos disponibles y de las diferentes capas climáticas para cada una de las especies seleccionadas, así como la sensibilidad de cada una de acuerdo a las proyecciones para cambio climático utilizadas.

7.1 *Pinus ayacahuite*

De acuerdo a los valores de los índices y coeficientes obtenidos (Figura 1) se puede observar que si se considera sólo en índice Kappa, todos los modelos resultarían con un bajo desempeño. Sin embargo, los resultados obtenidos con los demás índices muestran que los modelos resultan tener un buen desempeño al alcanzar valores cercanos a 1. De entre todos los modelos obtenidos para esta especie, el elaborado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima), resultó ser el mejor, por sus valores más altos de los índices TSS, CCI, Sensibilidad y Especificidad. Para los modelos realizados con datos de abundancia, el valor más alto de coeficiente de correlación ($r = 0.816$) se obtuvo con el análisis 1.

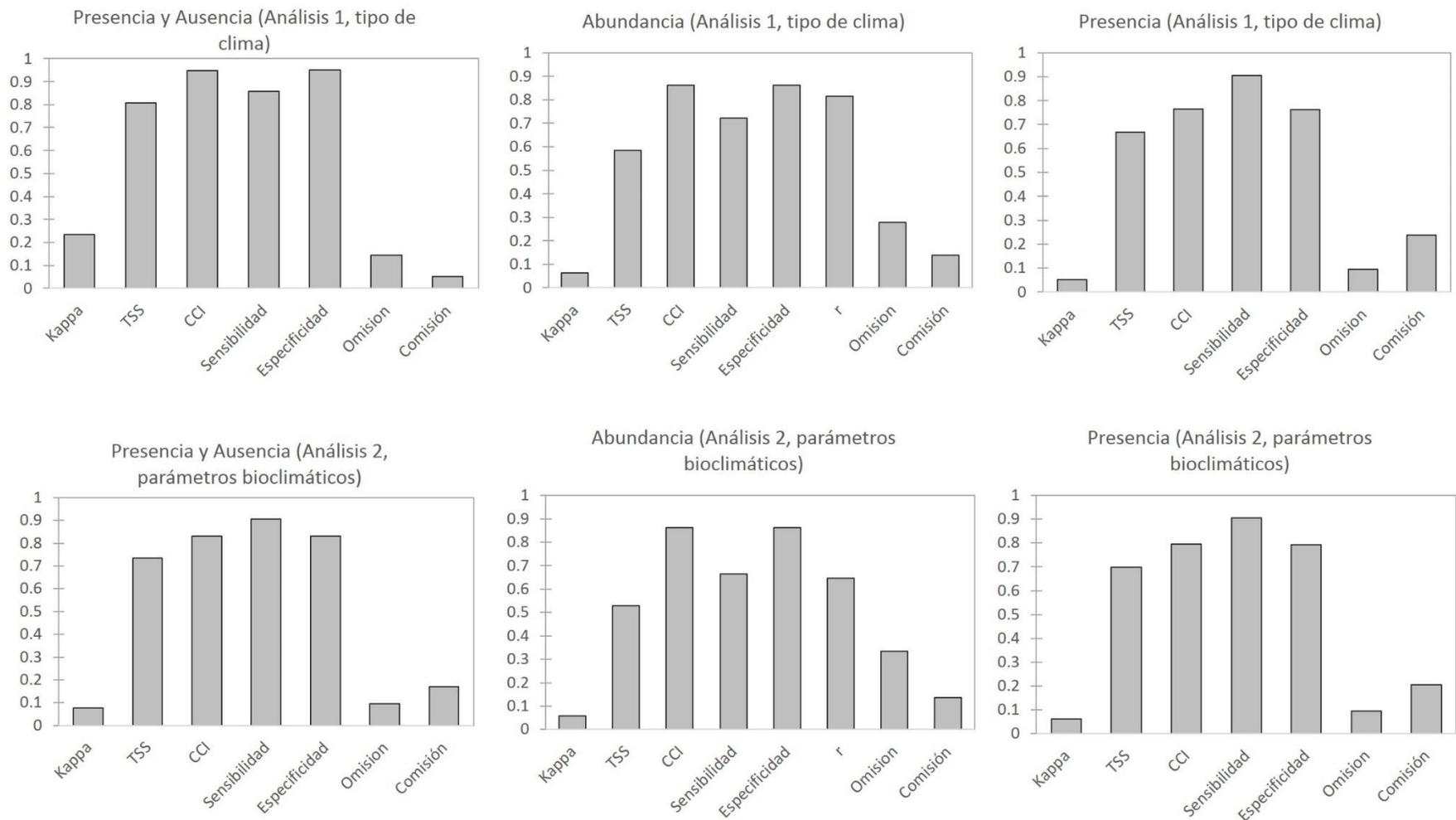


Figura 1. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de *P. ayacahuite*

Como se observa en la Figura 2 y en los mapas del Anexo 1, todos los modelos obtuvieron superficies potenciales de distribución muy diferentes desde la perspectiva espacial y cuantitativa. Para esta especie, los modelos elaborados a partir de datos de presencia son los que presentaron una superficie mayor en comparación con las superficies obtenidas por los demás modelos, donde el modelo elaborado a partir de datos de presencia-ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) fue el que presentó la menor superficie potencial para el estado. Si se toma en consideración la sobrepredicción de las áreas de distribución (error de comisión), ésta es mayor en los modelos realizados a partir de datos de presencia, pero hay que considerar que estos modelos no utilizan los datos de ausencia para modelar la distribución.

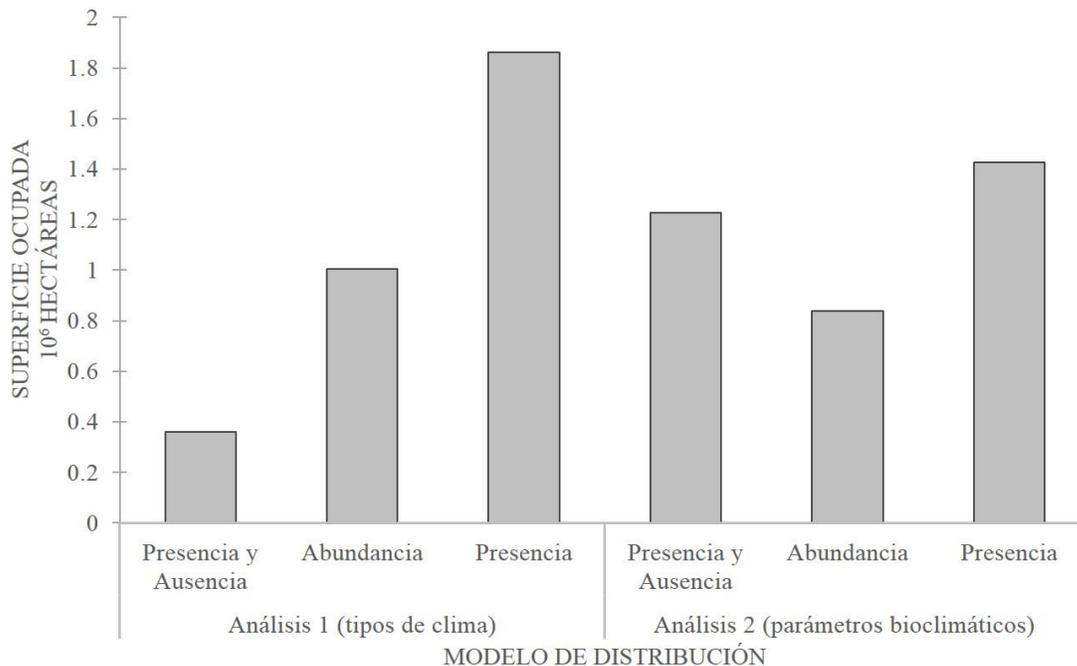


Figura 2. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de *P. ayacahuite*

De acuerdo a la Figura 3, los modelos elaborados a partir de datos de abundancia y de datos de presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fueron los que presentaron mayores porcentajes de cambio de más del 60%. Por su parte, el modelo de presencia y ausencia elaborado bajo el análisis 2, presentó los porcentajes de cambio más bajos de entre

todos los modelos aplicados para esta especie. Los mayores porcentajes de cambio los presentaron las proyecciones de cambio climático bajo escenario de emisiones A2 tanto para el modelo HADGEM1 como con el modelo MPIECHAM5. Caso contrario con lo ocurrido con el modelo de circulación general HADGEM1 bajo el escenario de emisiones B2, el cual mostró porcentajes de cambio menores de entre todas las proyecciones utilizadas.

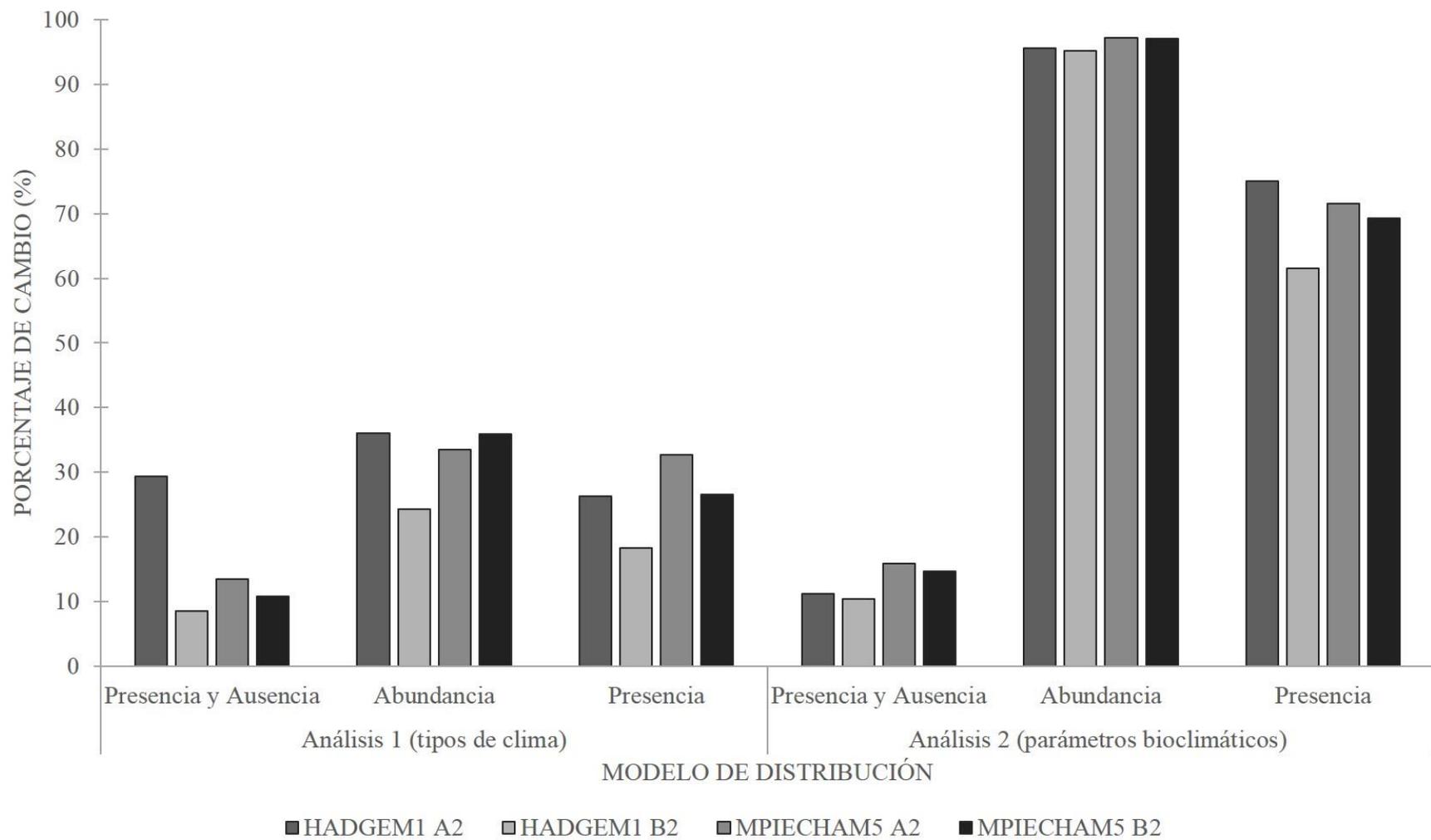


Figura 3. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para *P. ayacahuite*

7.2 *Pinus montezumae*

De acuerdo a los valores de los índices Kappa, TSS y de sensibilidad obtenidos por los modelos de distribución de esta especie, se observa que todos los modelos presentan un mal desempeño, ya que obtuvieron valores cercanos a cero (Figura 4). Caso contrario ocurre con los valores del índice de especificidad, donde todos los modelos obtuvieron valores altos, lo que indica que hay poca sobrepredicción de las áreas de distribución (error de comisión), pero sí hay un sobre ajuste de las mismas (error de omisión), ya que se obtuvieron valores de sensibilidad cercanos a cero. De los modelos elaborados a partir de datos de abundancia, el valor más alto de coeficiente de correlación ($r = 0.791$) se obtuvo con el análisis 1 (tipo de clima).

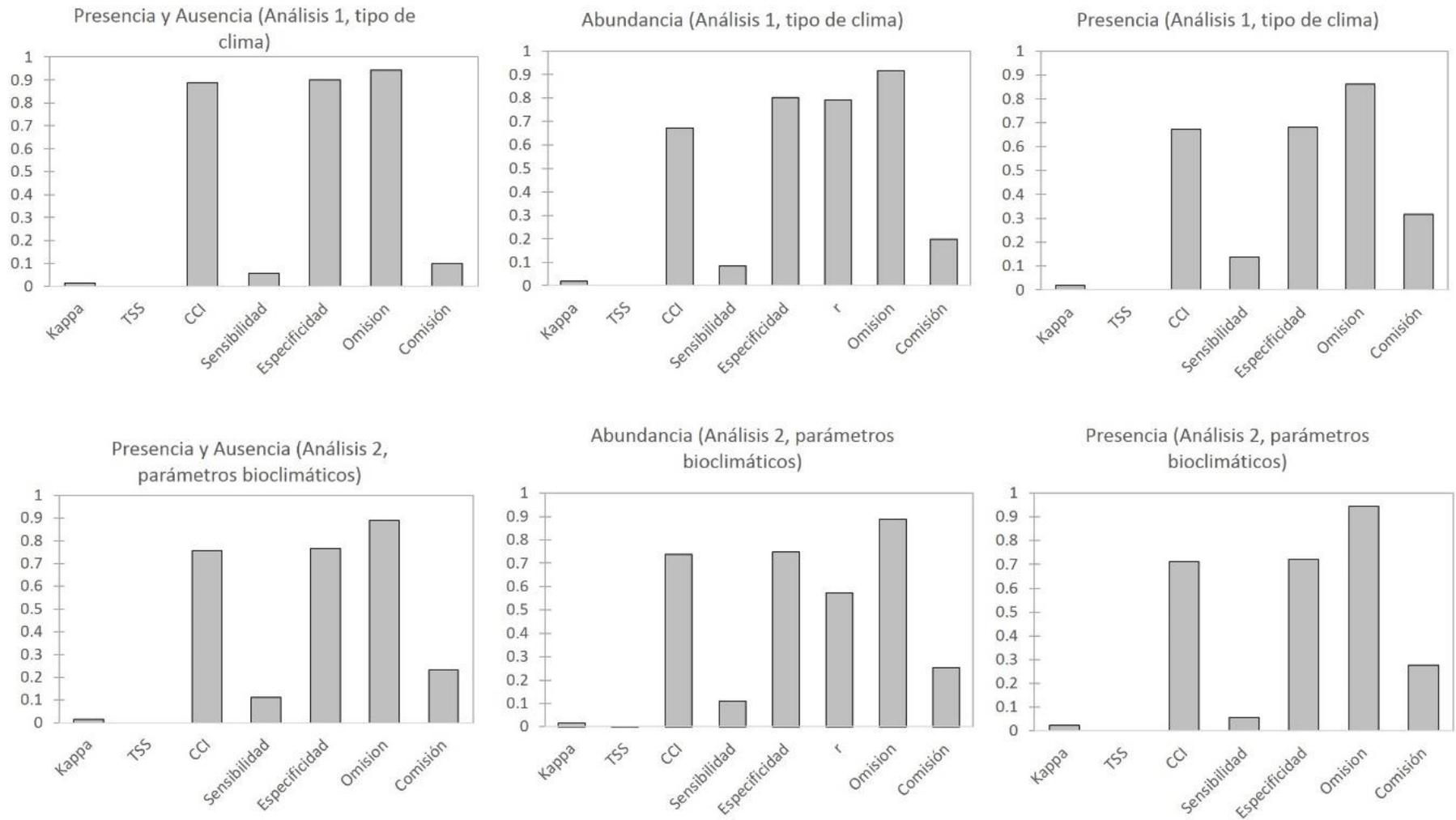


Figura 4. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de *P. montezumae*

Como se observa en la Figura 5 y en los mapas del Anexo 2, todos los modelos obtuvieron superficies potenciales de distribución muy diferentes. Para esta especie, los modelos elaborados a partir de datos de presencia (análisis 1, tipo de clima) y datos de abundancia (análisis 2, parámetros bioclimáticos) son los que presentaron una superficie mayor en comparación con las superficies obtenidas por los demás modelos, donde el modelo elaborado a partir de datos de presencia-ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) fue el que presentó la menor superficie potencial para el estado.

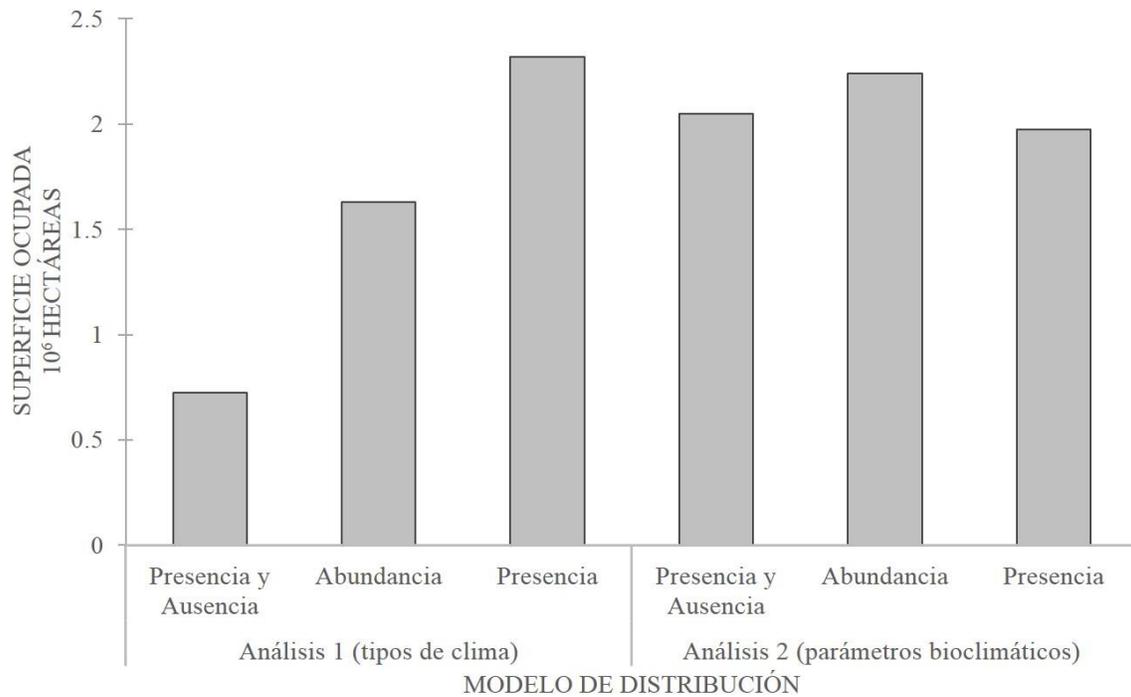


Figura 5. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de *P. montezumae*

De acuerdo a la Figura 6, el modelo elaborado a partir de datos presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó mayores porcentajes de cambio en más del 50%. Por su parte, el modelo de presencia y ausencia elaborado bajo el análisis 1 (tipo de clima), presentó los porcentajes de cambio más bajos de entre todos los modelos

aplicados para esta especie. Los mayores porcentajes de cambio los presentaron las proyecciones de cambio climático con el modelo MPIECHAM5 bajo escenario de emisiones A2. Caso contrario con lo ocurrido con el modelo de circulación general HADGEM1 bajo el escenario de emisiones B2, el cual mostró porcentajes de cambio menores de entre todas las proyecciones utilizadas.

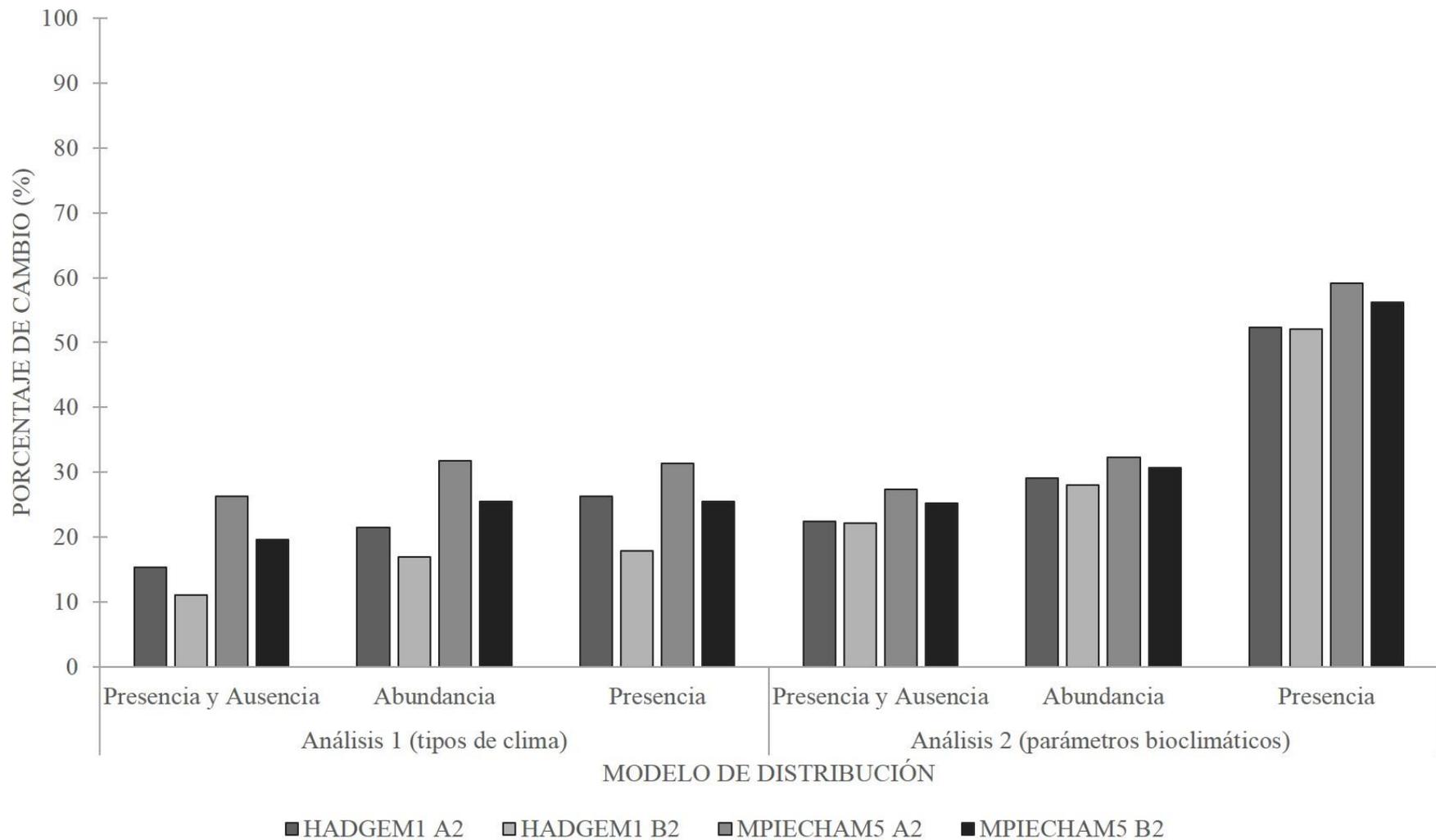


Figura 6. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para *P. montezumae*

7.3 Pinus oocarpa

De acuerdo a los valores de los índices y coeficientes obtenidos (Figura 7) se puede observar que sólo el modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) resultó ser el mejor modelo para esta especie, ya que fue el que obtuvo valores más altos en los índices CCI, sensibilidad y especificidad.

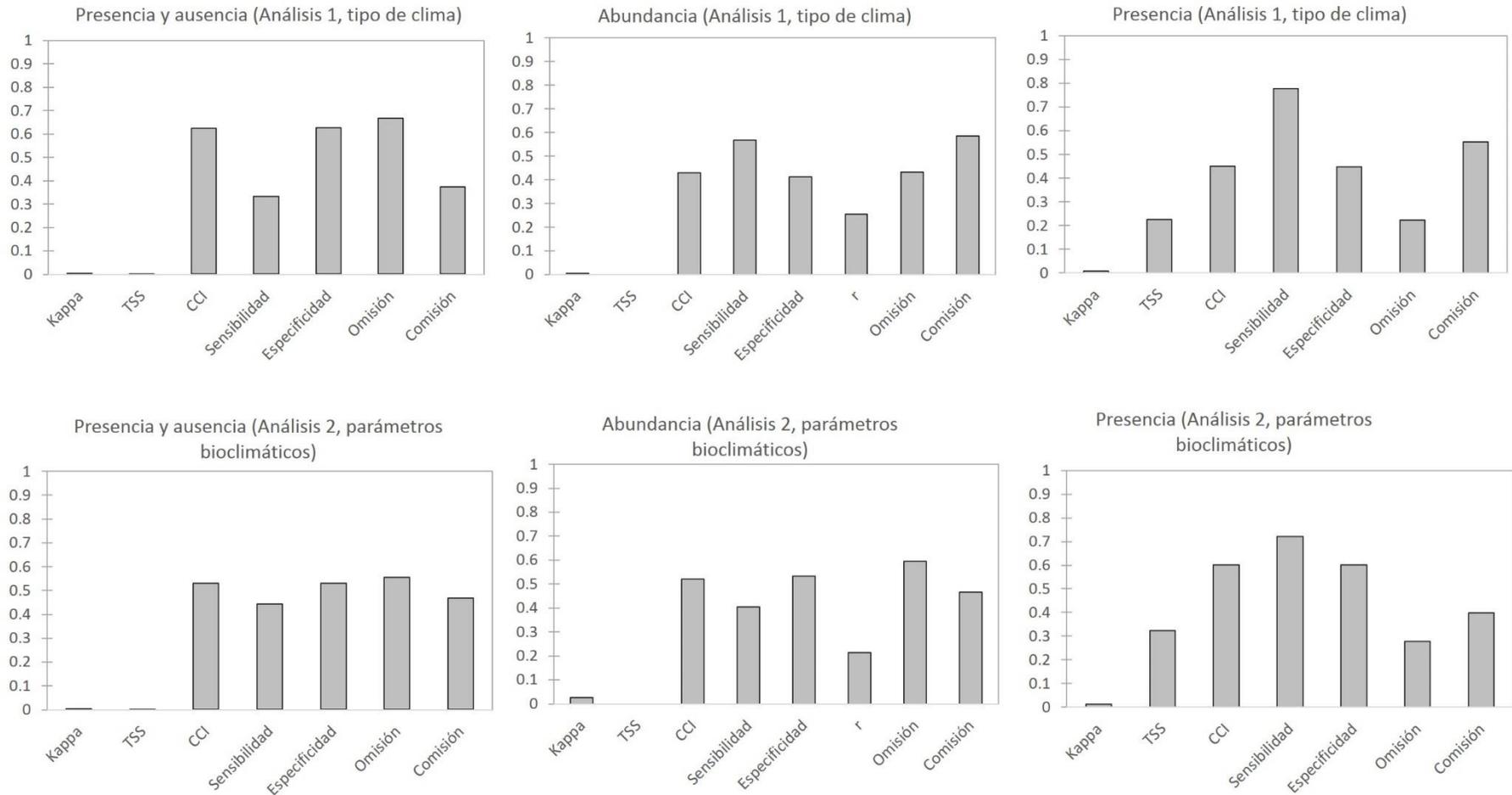


Figura 7. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de *P. oocarpa*

Como se observa en la Figura 8 y en los mapas del Anexo 3, todos los modelos obtuvieron superficies potenciales de distribución muy diferentes desde la perspectiva espacial y cuantitativa. Para esta especie, el modelo elaborado a partir de datos de abundancia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó una superficie mayor en comparación con las superficies obtenidas por los demás modelos, donde el modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó la menor superficie potencial para el estado.

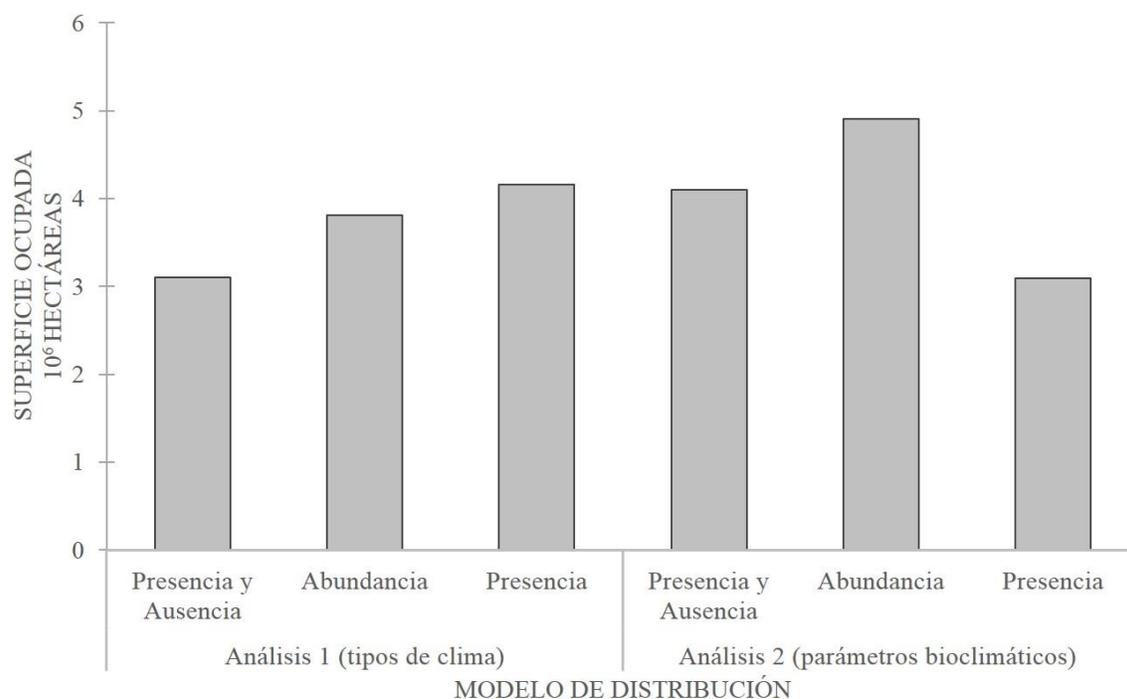


Figura 8. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de *P. oocarpa*

De acuerdo a la Figura 9, los modelos elaborados bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) obtuvieron mayores cambios en comparación con los modelos realizados bajo el análisis 1 (tipo de clima). El modelo de presencia y ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) presentó los porcentajes de cambio más bajos de entre todos los modelos para

esta especie, mientras que el modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó los mayores porcentajes de cambio. De las proyecciones de cambio utilizadas, el modelo HADGEM1 bajo el escenario de emisiones A2 fue el que presentó un mayor porcentaje cambio. Mientras que el modelo HADGEM1 bajo el escenario de emisiones B2 fue el que presentó menores cambios.

El mejor modelo para esta especie [datos de presencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos)] (Figura 7) presento una superficie potencial total de 3 090 000 hectáreas (Figura 8). De las cuatro proyecciones de cambio climático utilizadas en este modelo (Figura 9), la proyección MPIECHAM5 bajo el escenario de emisiones B2 fue con el que obtuvo mayores porcentajes de cambio (76.5%) y la proyección HADGEM1 bajo el escenario de emisiones A2 la que obtuvo menores porcentajes de cambio (70.9%).

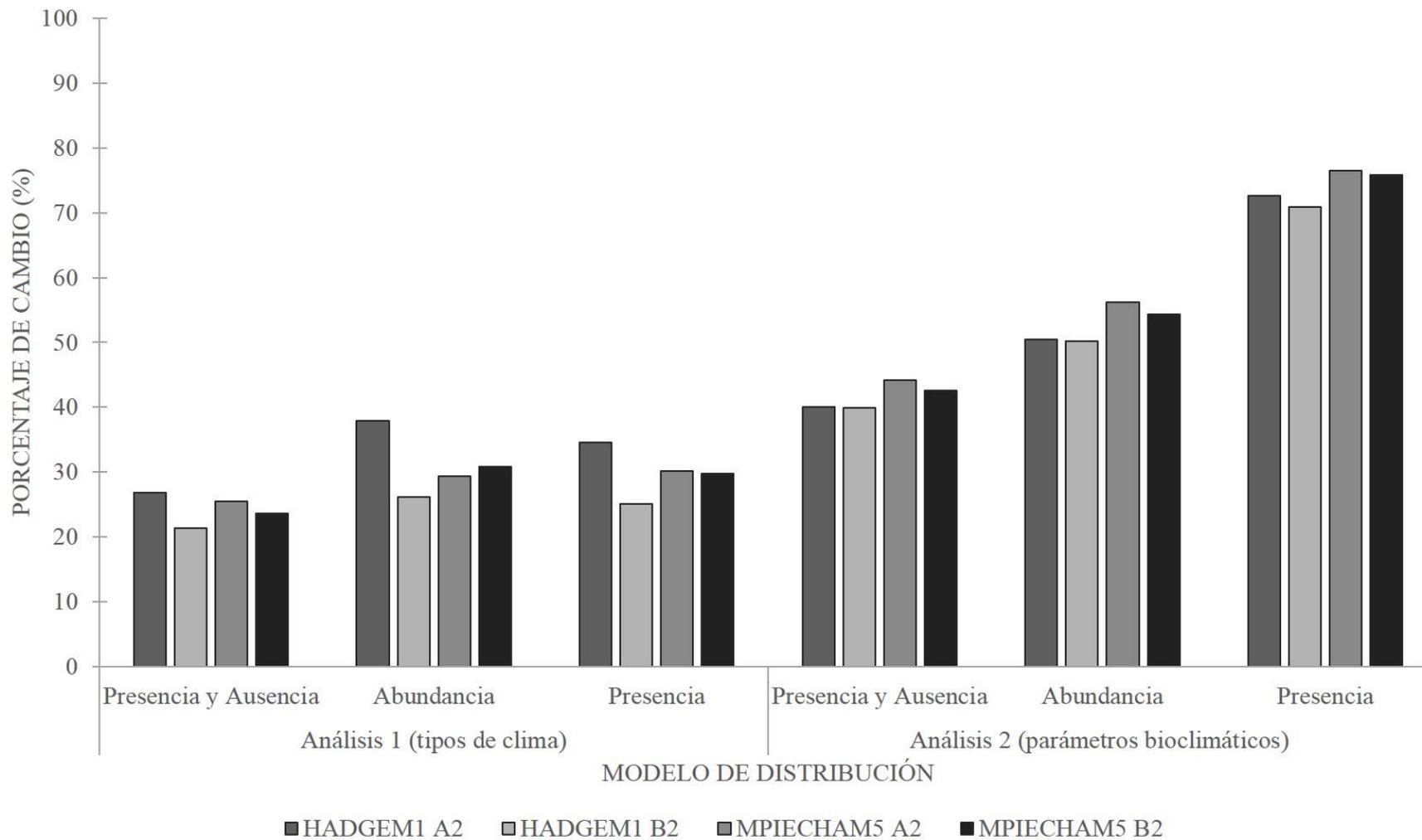


Figura 9. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para *P. oocarpa*

7.4 Quercus candicans

De acuerdo a los valores de los índices y coeficientes obtenidos (Figura 10) se observa que sólo dos modelos son los que presentan un buen desempeño; el modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) y el modelo elaborado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos), ya que obtuvieron valores altos del índice de sensibilidad de 0.906 y 0.719 respectivamente.

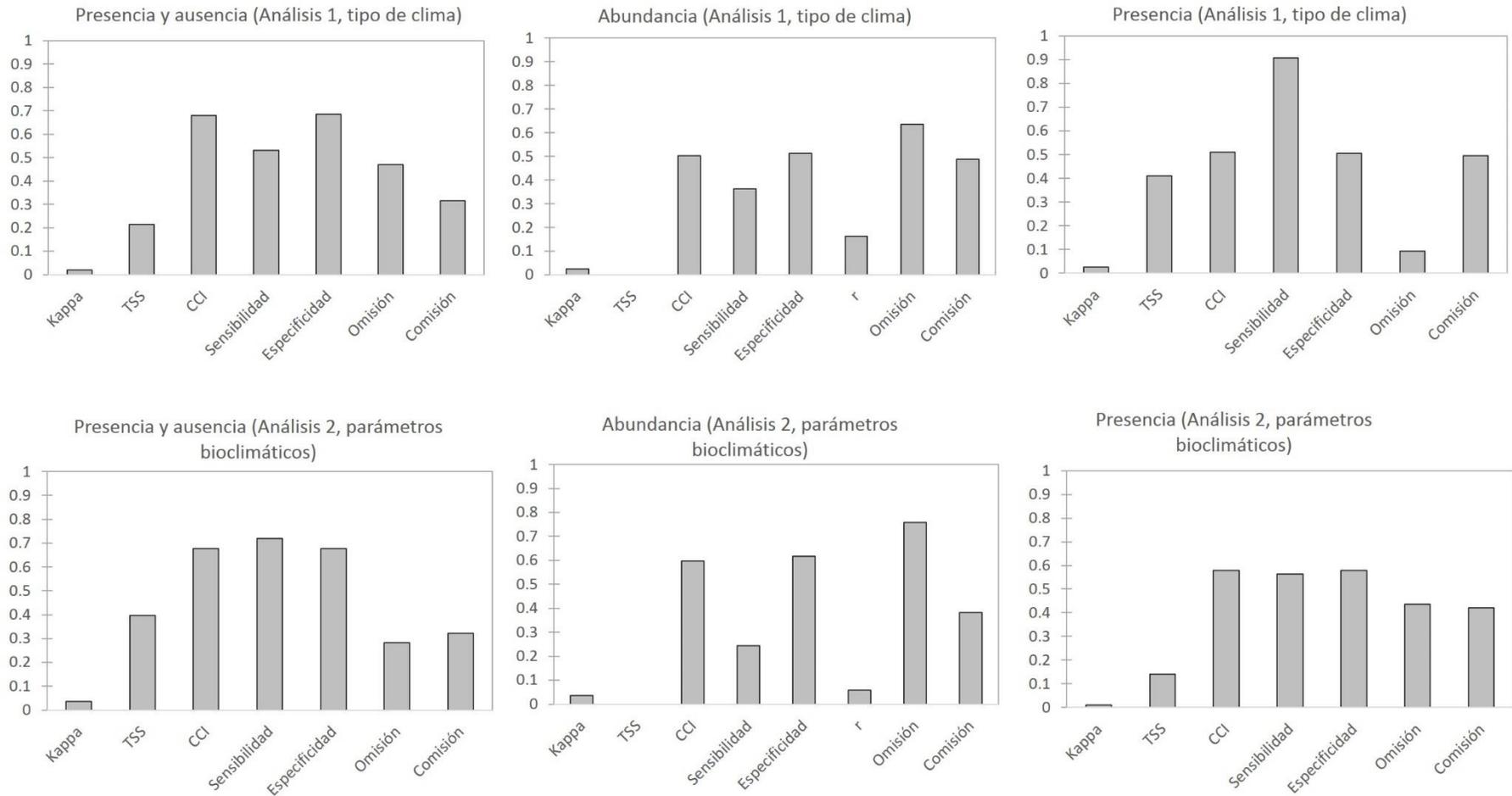


Figura 10. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de *Q. candicans*

Como se observa en la Figura 11 y en los mapas del Anexo 4, todos los modelos obtuvieron superficies potenciales de distribución muy diferentes. Para esta especie, el modelo elaborado a partir de datos de abundancia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó una superficie menor en comparación con las superficies obtenidas por los demás modelos, donde el modelo elaborado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) fue el que presentó la mayor superficie potencial para el estado.

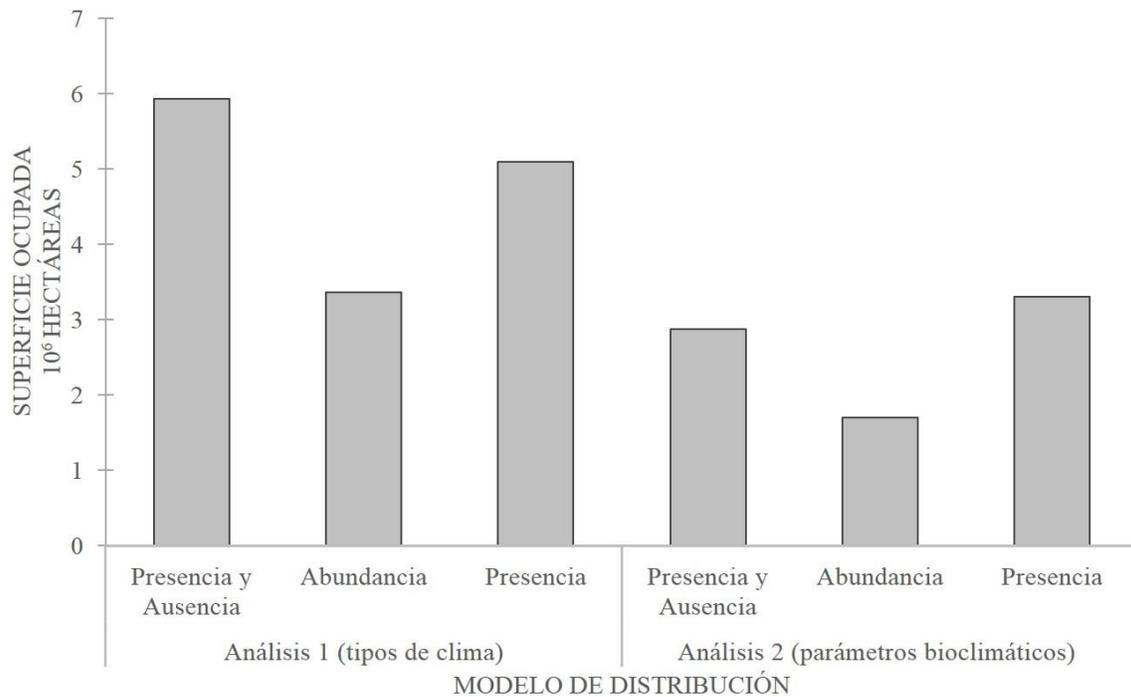


Figura 11. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de *Q. candicans*

De acuerdo a la Figura 12, los modelos elaborados bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) obtuvieron mayores cambios en comparación con los modelos realizados bajo el análisis 1 (tipo de clima). El modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) presentó los porcentajes de cambio más bajos de entre todos los

modelos para esta especie, mientras que el modelo elaborado a partir de datos de abundancia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó los mayores porcentajes de cambio. De las proyecciones de cambio utilizadas, el modelo MPIECHAM5 bajo el escenario de emisiones A2 fue el que presentó un mayor porcentaje cambio. Mientras que el modelo HADGEM1 bajo el escenario de emisiones B2 fue el que presentó menores cambios.

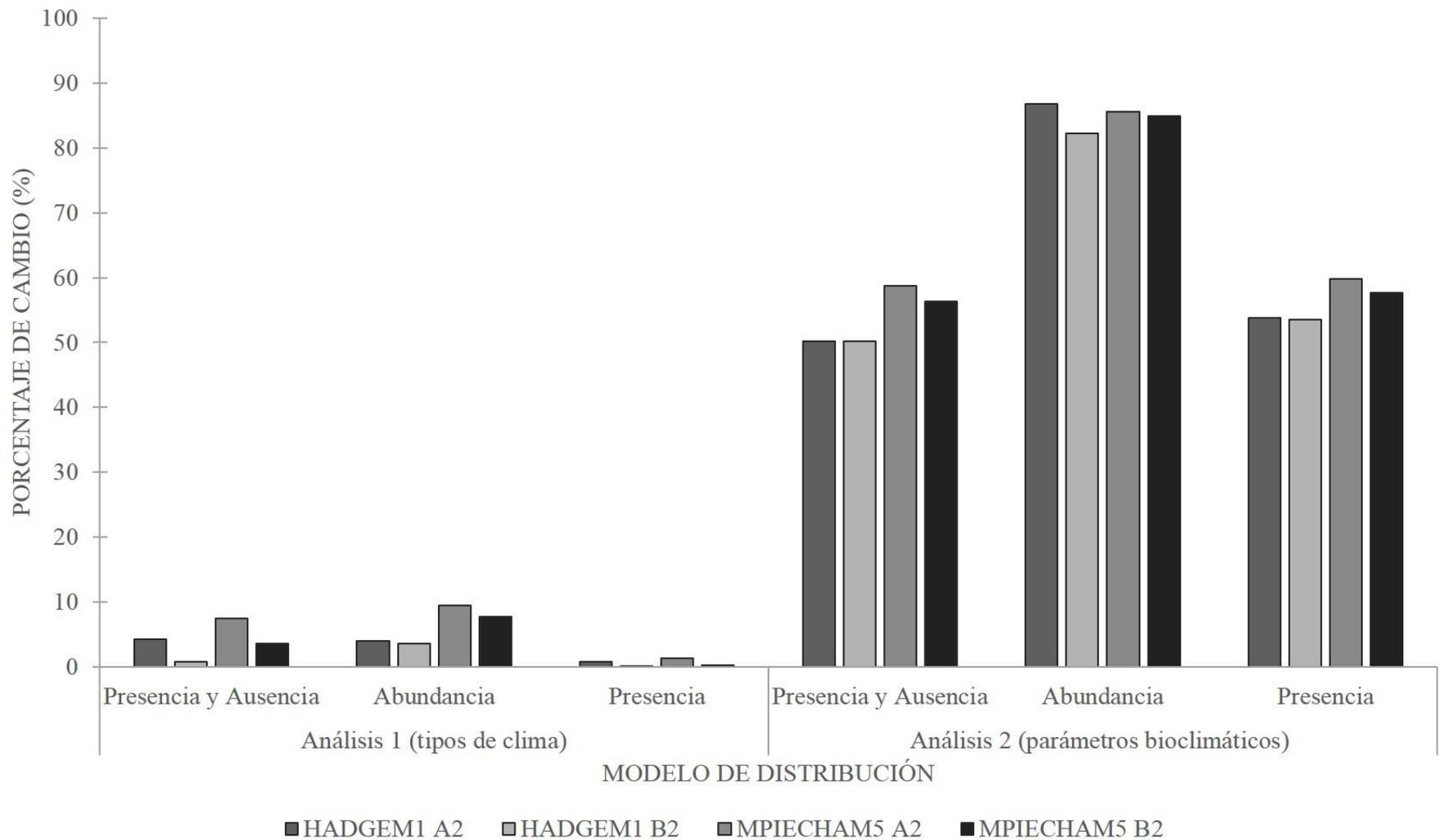


Figura 12. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para *Q. candicans*

7.5 Quercus uxoris

De acuerdo a los valores de los índices y coeficientes obtenidos (Figura 13) se puede observar que para esta especie, solamente dos modelos resultaron presentar buen desempeño; el modelo generado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) y el modelo elaborado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos), ya que ambos modelos obtuvieron los valores más altos en el índice de sensibilidad, 0.75.

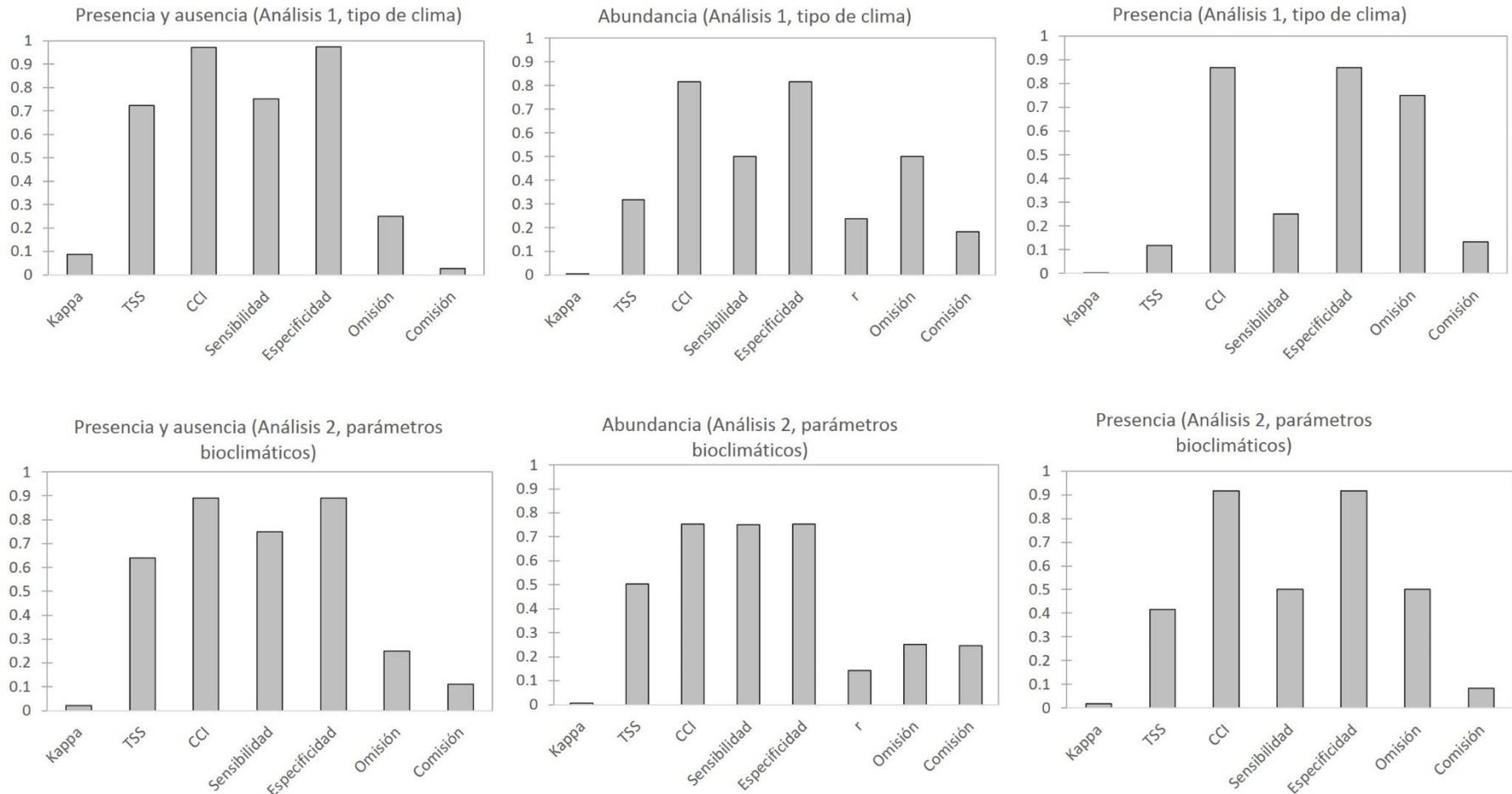


Figura 13. Valores de los coeficientes e índices calculados según cada modelo de distribución potencial de *Q. uxoris*

Como se observa en la Figura 14 y en los mapas del Anexo 5, todos los modelos obtuvieron superficies potenciales de distribución muy diferentes desde la perspectiva espacial y cuantitativa. Para esta especie, el modelo elaborado a partir de datos de abundancia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó una superficie mayor en comparación con las superficies obtenidas por los demás modelos, donde el modelo elaborado a partir de datos de presencia y ausencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) fue el que presentó la menor superficie potencial para el estado.

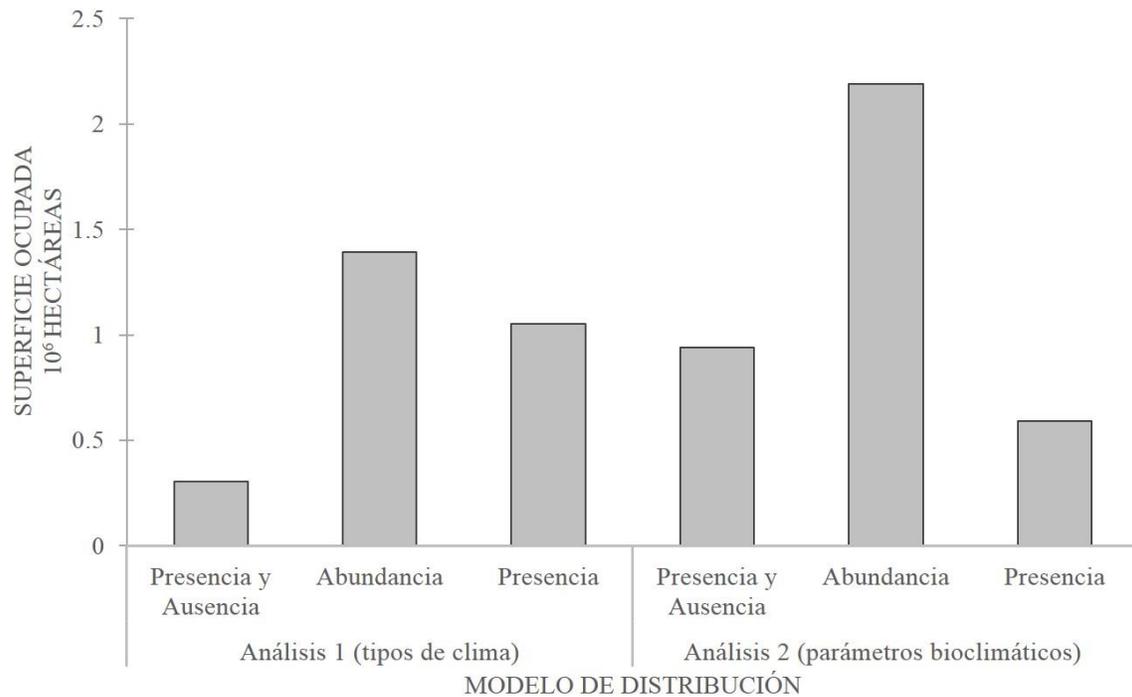


Figura 14. Superficie potencial obtenida de acuerdo a cada modelo de distribución potencial de *Q. uxoris*

De acuerdo a la Figura 15, los modelos elaborados bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) obtuvieron mayores cambios en comparación con los modelos realizados bajo el análisis 1 (tipo de clima). El modelo elaborado a partir de datos de presencia bajo el análisis 1 (tipo de clima) presentó los porcentajes de cambio más bajos de entre todos los

modelos para esta especie, mientras que el modelo elaborado a partir de datos de abundancia bajo el análisis 2 (parámetros bioclimáticos) fue el que presentó los mayores porcentajes de cambio. De las proyecciones de cambio utilizadas, el modelo MPIECHAM5 bajo el escenario de emisiones A2 fue el que presentó un mayor porcentaje cambio. Mientras que el modelo HADGEM1 bajo el escenario de emisiones B2 fue el que presentó menores cambios.

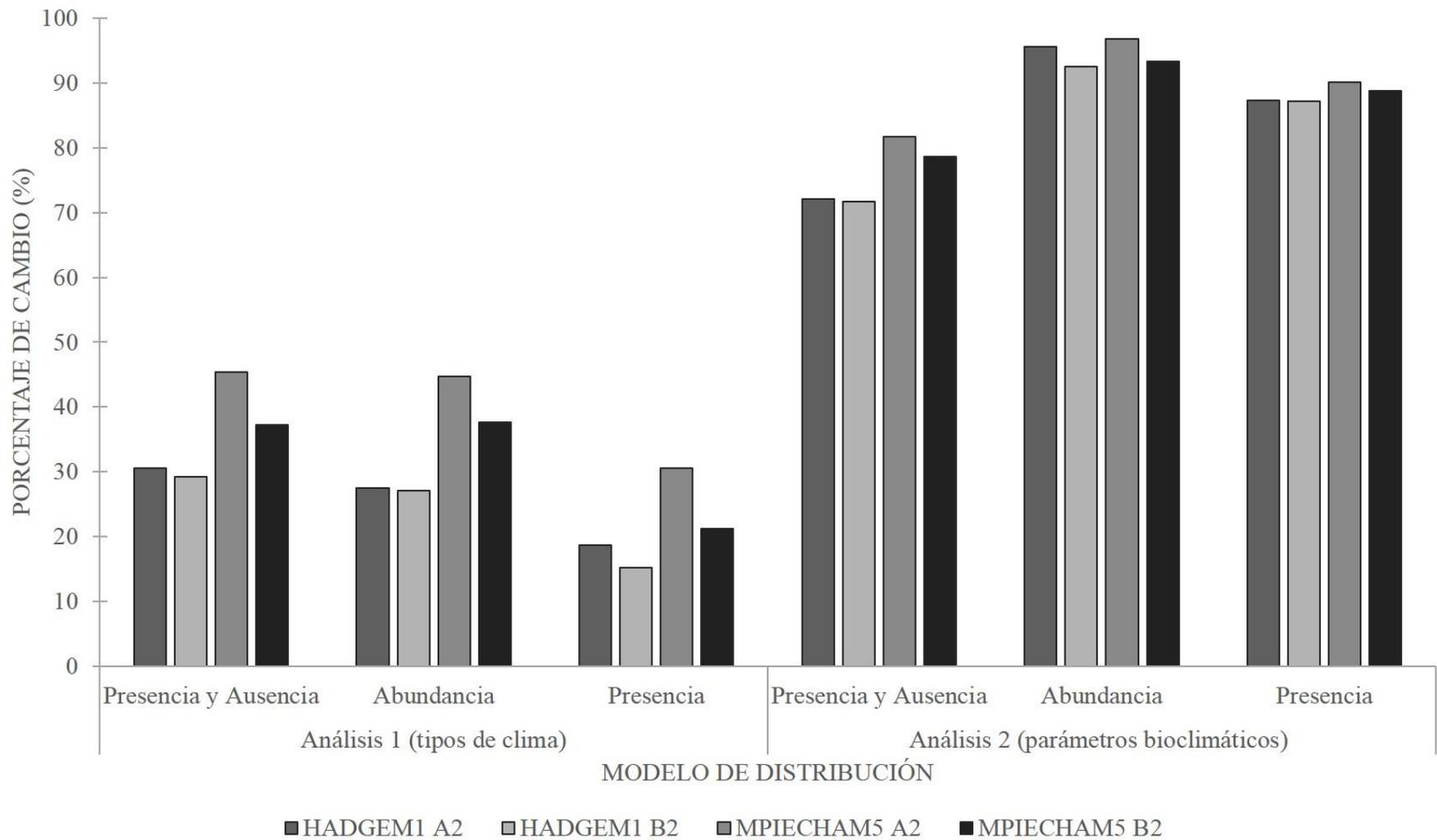


Figura 15. Porcentajes de cambio de acuerdo a cada proyección de cambio climático utilizada para *Q. uxoris*

8. DISCUSIÓN

En este estudio se utilizaron las variables climáticas de dos formas: la primera son conocidas como parámetros bioclimáticos (Fernández-Eguiarte et al., 2012) y la segunda condensada en una clasificación climática, en este caso la de Köppen modificada por García (2004). Hacerlo de esta manera permite analizar dos formas de cómo interpretar la interacción de las variables que conforman las condiciones climáticas de un sitio. Las diferencias entre la capa de tipos de climas y las variables bioclimáticas toman su importancia en la modelización de la distribución de las especies y en la evaluación de los efectos del cambio climático sobre las mismas. En el análisis de la distribución de las especies su relevancia radica en la forma de abordar el modelado. Por ejemplo, al utilizar una clasificación de tipos de clima se da por sentada la interacción de los elementos climáticos en un lugar, esto es porque en una sola variable (tipo climático) se consideran la temperatura, la marcha de la temperatura, la cantidad de lluvia que se deposita, así como también su distribución a lo largo del año, principalmente. En cambio, en los parámetros bioclimáticos se consideran los elementos climáticos por separado.

La forma en que se integran las variables ambientales es relevante cuando se modelan con métodos como los Modelos Lineales Generalizados o el programa Maxent, ya que su modelación no considera la interacción de las variables. En el caso de este último, puede llegar a tomar en cuenta el aporte de cada variable en el modelo, pero no la interacción entre ellas (Stankowski y Parker, 2011).

En este estudio, además se incluyó en la modelización de la distribución, información del tipo de suelo, por considerarlo como un factor importante para el establecimiento y permanencia de las especies arbóreas seleccionadas y por la disponibilidad de la información en el formato adecuado.

En cuanto a los efectos del cambio climático sobre la distribución de las especies, las reducciones en las áreas de distribución potencial fueron mayores en los modelos elaborados a partir del Análisis 2 (parámetros bioclimáticos) que en los modelos realizados por el Análisis 1 (tipo de clima). Se muestra entonces que la magnitud de los cambios sobre las áreas de distribución de las especies depende de las capas ambientales que se utilicen en el modelado y de la evaluación de los efectos del cambio climático que se realice.

Existen diversos problemas para incluir los datos espaciales en el modelado de la distribución de las especies y que es importante tener en consideración, tal es el caso de la escala utilizada durante el proceso de modelización, porque se puede realizar a nivel global, nacional, regional, local. Esto tiene una gran influencia en los resultados, porque el tamaño del área de estudio puede influir en la validación de los modelos (Stankowski y Parker, 2011; Barvea et al., 2011).

Otras variables como la inclinación y exposición de la ladera pueden ser elementos importantes a considerar en la distribución de las especies; sin embargo, la resolución de los modelos digitales de elevación puede ser una limitante para obtener información detallada que contribuya a delimitar adecuadamente las áreas en las que potencialmente se encuentra una especie. En archivos disponibles como el WorldClim (<http://www.worldclim.org/>), la resolución de ≈ 1 km, puede resultar con poco detalle en algunas zonas, para obtener este tipo de información.

De la información climática disponible para México, la del Atlas Climático Digital de México versión 2 (Fernández-Eguiarte et al., 2012) es una buena alternativa, ya que los datos se generaron a partir de datos de estaciones meteorológicas de México con información que abarca desde 1902 hasta 2011. Esta información también se encuentra a una resolución ≈ 1 km; sin embargo, es la mejor representación espacial disponible. Es

necesario reconocer que el mayor problema proviene de la falta de estaciones meteorológicas en puntos críticos en México y esto limita la generación de cartografía más detallada.

El generar modelos de distribución brinda una gran gama de opciones para resolver la falta de información biológica, ya que existen diversas aplicaciones de los modelos de distribución de especies. El ejemplo más obvio es el de determinar la distribución potencial de las especies. Pero también se pueden aplicar en otros ámbitos como en la protección y conservación de las especies, en la reintroducción de especies amenazadas, riesgo debido a especies invasoras o en la distribución de enfermedades infecciosas (Peterson et al., 2002; Peterson, 2003; Araujo et al., 2005; Martínez-Meyer et al., 2006; Nogués-Bravo, 2009).

Los Modelos Lineales Generalizados y el programa Maxent, son métodos de modelado que trabajan tanto con variables continuas como con variables categóricas, por esta razón en este estudio no se utilizaron otros métodos como por ejemplo GARP, DOMAIN o BIOCLIM, debido a que éstos sólo trabajan con variables continuas (Phillips et al., 2006; Elith et al., 2011).

Un factor importante para el proceso de modelado de la distribución es el tipo y calidad de datos disponibles de las especies con el que se cuente, de esta información depende en gran medida el método de modelado que puede aplicarse. En este trabajo es notable que de acuerdo al tipo de dato empleado, para cada especie resultó mejor aplicar un tipo de modelado. Esto hace evidente que no todas las especies se pueden modelar de la misma forma. Por lo que se debe de considerar cuál es el tipo de datos con el que se cuenta y si éste es la mejor alternativa para modelar la distribución (Stankowski y Parker, 2011; Gastón y García-Viñas, 2011).

Aun cuando aparentemente existe una extensa gama de fuentes de información relacionadas con la ubicación de especies, es importante mencionar que una minuciosa labor de revisión de los datos es necesaria para evitar errores de distinto tipo. Una primera revisión de los datos incluye la nomenclatura, datos repetidos, pero fundamentalmente para la distribución espacial, es la georreferenciación. En este último punto a considerar es la precisión en la ubicación del individuo colectado, así como el sistema de coordenadas utilizado para su ubicación (e.g. el Datum). La carencia de esta información y los errores incluidos en las bases de datos se constituyen en una fuente de error indirecta inmersa en los modelos.

Otro problema fundamental es la información disponible en bases de datos sobre la ubicación de las especies y del tipo de información que existe (presencia, no abundancia), por lo que el realizar estudios como el presente trabajo con pocos datos cuantitativos de las especies, limita el análisis y por ende las conclusiones que se arrojen de dichos análisis. Como se observa en los resultados obtenidos, no todos los modelos generados a partir de los datos de abundancia resultaron tener un buen desempeño; una de las razones a la que se le puede atribuir esto es a la falta de información cuantitativa de las especies.

El tamaño de la muestra es otra limitante para la modelización, especialmente cuando se utilizan especies que cuentan con pocos datos. Muestras pequeñas pueden afectar los análisis estadísticos y puede dar como resultado malos modelos (Hernández et al., 2006). Ejemplo de esto, es el estudio realizado por Hanberry et al. (2012), donde sugieren que se debería de contar por lo menos con 200 puntos para modelar. Partiendo de esta idea, se necesita un mayor esfuerzo de muestro en nuestro país para conocer mejor los recursos con los que se cuenta y conformar bases de datos sólidas con datos suficientes y de calidad. Esto cobra mayor importancia para las especies de distribución restringida, ya que de

acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, estas especies son más sensibles a los efectos del cambio climático. Además, el contar con una localización con mayor precisión de las especies, disminuiría la incertidumbre en este tipo de estudios. Lo anterior es muy importante ya que el número de puntos con los que se trabajó en este estudio, no son suficientes para modelar la distribución, pero hay que tener en cuenta que es la información que se encontraba disponible al momento de realizar el estudio.

En este estudio se utilizaron datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2004-2009) de la CONAFOR, y aun cuando algunos puntos de muestreo pueden no ser representativos de la vegetación que existe en los lugares circundantes, los datos disponibles ofrecen una base robusta de información de abundancia de las especies y conforma una malla que cubre las comunidades vegetales presentes en el país. Estos datos son sistemáticos, con muestras homogéneas de los sitios y comparables entre sí, por lo que dan información de la presencia o ausencia de las especies en los muestreos realizados, datos valiosos para conocer la distribución de las especies.

Cuando se trabaja con el modelado de la distribución de las especies así como la evaluación de su sensibilidad ante el cambio climático, esto se realiza bajo ciertos supuestos y este trabajo no fue la excepción, por lo que a continuación se mencionan dos: los puntos de presencia representan a poblaciones viables; y los datos de ausencia, fueron considerados como ausencia verdadera.

Para la elección de los mejores modelos, en este trabajo se otorgó mayor importancia a los índices de sensibilidad y especificidad. Esto es relevante, ya que métodos de modelado como Maxent, sólo utiliza datos de presencia, así que el ponderar las ausencias resultaría en malos modelos. Debido a que se cuenta con un mayor número de sitios con dato de ausencia que de presencia, esto crea un sesgo a favor de los datos de

ausencia. En este sentido, el índice de sensibilidad es el más informativo de los índices utilizados en estas evaluaciones. Un ejemplo de este sesgo a favor de los datos de ausencia, se observa en los valores obtenidos entre el índice de especificidad y el índice CCI, ya que los resultados son muy similares. El índice CCI tenderá a tomar valores similares ya sea de sensibilidad o especificidad, dependiendo del número de datos de presencia o ausencia con que se cuente.

En cuanto al índice Kappa, a pesar que es un índice que pondera las presencias y ausencias, en este estudio no resultó ser muy informativo, ya que de haber tomado sólo en cuenta este índice, todos los modelos para todas las especies analizadas hubieran sido muy malos al arrojar valores muy cercanos a cero. Este resultado no es exclusivo para este estudio, ya que concuerda con otros trabajos donde reportan que el índice Kappa no resulta ser tan eficiente para la evaluación de los modelos de distribución (Liu et al., 2005).

Existen diversos métodos para modelar la distribución de las especies y con cada método se pueden obtener diferentes resultados (Elith, et al., 2006; Hernández et al., 2006). Esto se observa para las especies donde en los resultados se obtienen más de un modelo con buen desempeño; el ejemplo más claro fue *P. ayacahuite*, donde todos los modelos fueron aceptables desde la perspectiva estadística, pero a nivel geográfico si son contrastantes.

Lo relevante de este trabajo es hacer evidente que ya sea por las características inherentes a las especies, por su tipo de distribución y/o por las propiedades de los datos que se tienen disponibles, no todos los modelos aplicados resultan ser los más adecuados para obtener un mejor resultado, por lo que el uso de un solo modelo para diversas especies puede ofrecer subestimación o sobrestimación en las áreas potenciales de distribución.

Con relación a las respuestas de las especies al cambio climático en el ámbito de su distribución, dependerá de la plasticidad genética y adaptabilidad de cada una de ellas ante

el cambio, ya que cada especie presenta adaptaciones muy particulares. Ejemplo de esto son algunas especies como los pinos seleccionados para este trabajo, que tienen atributos que han sido interpretados como adaptaciones a los incendios, tales como: corteza gruesa como en *P. montezumae*; o conos serótinos como en el caso de *P. oocarpa*.

Las proyecciones de cambio generadas con los modelos HADGEM1 y MPIECHAM5 bajo el escenario de emisiones A2 (emisiones altas de GEI) son las proyecciones donde las disminuciones en las áreas de distribución son mayores para todas las especies. En contraste la proyección con el modelo HADGEM1 con escenario B2 (emisiones moderadas de GEI) es la que se obtiene los porcentajes de cambio menores para todas las especies analizadas.

Urge realizar un biomonitoreo de los sistemas biológicos que son sensibles a los cambios en el clima, porque hay que considerar que actualmente existe una tasa de extinción de especies que no se ha visto desde el último evento de extinción en masa (Rockström et al., 2009). Esto es esencial, si consideramos que la biomasa forestal es uno de los mayores reservorios de carbono orgánico. Otro aspecto importante del biomonitoreo es observar si actualmente hay cambios en los límites arbóreos en respuesta al cambio climático. En trabajos previos han encontrado desplazamientos de entre 100-165 metros de los límites arbóreos en el siglo XX, además encontraron que las especies del género *Pinus* presentan individuos de menor tamaño (Kullman, 2001; Vicente-Serrano et al., 2010).

En las zonas donde se proyectan mayores cambios en el clima se deberían de estudiar a mayor detalle, esto para identificar otros factores además del cambio climático, que estén poniendo en peligro la permanencia de las especies, como los incendios, sequías, especies invasoras, plagas, enfermedades, tormentas, entre otros, para tomar decisiones a

corto plazo y que se realicen acciones inmediatas, antes de llegar a extinciones locales (Villers y Trejo, 2004; Moore y Allard, 2008).

Gómez Díaz et al. (2011) encontraron reducciones en las áreas de distribución para *P. ayacahuite* de hasta 80% que concuerdan con los resultados obtenidos con el presente trabajo, donde se observan reducciones en más del 60% de su área de distribución potencial.

Las especies de amplia distribución que se seleccionaron, corresponden a los resultados obtenidos, ya que *Q. candicans* y *P. oocarpa* son las especies que obtuvieron los valores de superficie totales más altos, 5, 932, 619 hectáreas y 4, 911, 623 hectáreas respectivamente, en comparación con las especies de distribución restringida (*P. ayacahuite*, 1, 862, 867 hectáreas; *P. montezumae*, 2, 319, 901 hectáreas; *Q. uxoris*, 2, 189, 908 hectáreas) que presentaron menores superficies en el estado. Además, las especies de amplia distribución obtuvieron los porcentajes de cambio máximos menores (76.5% para *P. oocarpa* y 86.5% para *Q. candicans*) en comparación con las especies de distribución restringida, donde se observaron cambios de más del 95% en las áreas potenciales de distribución. Lo anterior cumple con la hipótesis inicial del trabajo, donde se argumenta que si las condiciones climáticas cambian, las especies con intervalos de tolerancia más amplios (especies de amplia distribución) serán capaces de enfrentar los cambios, en contraste las especies con intervalos restringidos serán más sensibles (especies de distribución restringida). Esto concuerda con lo reportado por Trejo et al. (2011) donde argumentan que las especies con distribución restringida, con pequeñas poblaciones y con ciclos de vida largos (largos periodos regenerativos) presentan un riesgo mayor ante el cambio climático. Otro aspecto importante que hay que recalcar, es que la capacidad de respuesta de cada especie se verá afectada por el estado de conservación de la vegetación y

por factores como la deforestación (Ammann, 2000; Puhe y Ulrich, 2001; Del Castillo et al., 2004; Villers y Trejo, 2000; Trejo et al., 2011).

9. CONCLUSIONES

- Se pueden reconocer las condiciones ambientales y los límites de distribución de las especies al hacer un análisis de la distribución potencial bajo las restricciones de la información disponible.
- Hay diversos factores que afectan el modelado de la distribución de las especies así como la evaluación de su sensibilidad ante el cambio climático, tales como: el tamaño del área de estudio, la escala con que se trabaje, tamaño de la muestra, el tipo de datos de las especies y el tipo de capas ambientales con que se modele.
- No para todas las especies se modela mejor su distribución con el mismo tipo de datos (presencia y ausencia, abundancia o presencia) por lo que se debe tener en cuenta cual es el tipo de datos con el que se cuenta y si este es la mejor alternativa para modelar la distribución.
- La magnitud de los efectos del cambio climático sobre las áreas de distribución de las especies depende de las capas ambientales que se utilicen en el modelado y de la cantidad de gases de efecto invernadero que se emitan en la atmósfera.
- Las especies de distribución restringida (*P. ayacahuite* y *Q. uxoris*) son más sensibles al cambio climático, en comparación con las especies de amplia distribución (*P. oocarpa* y *Q. candicans*), por lo que a mayores superficies de distribución, menores son los efectos del cambio climático.

10. LITERATURA CONSULTADA

- Aitken, S., Yeaman, S., Holliday, J., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2007). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1, 95-111.
- Allouche, O., A., T., & R., K. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43, 1223–1232.
- Ammann, B. (2000). Biotic responses to rapid climatic changes: Introduction to a multidisciplinary study of the Younger Dryas and minor oscillations on an altitudinal transect in the Swiss Alps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 159, 191–201.
- Araújo, M., & Peterson, A. (2012). Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93(7), 1527–1539.
- Araujo, M., Thuiller, W., P., W., & Reginster, I. (2005). Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: Implications for conservation planning. *Global Ecology and Biogeography*, 14, 17-30.
- Arizaga, S., Martínez-Cruz, J., Salcedo-Cabrales, M., & Bello-González, M. (2009). *Manual de la diversidad de encinos michoacanos*. México: INE, SEMARNAT.
- Ashcroft, M., French, K., & Chisholm, L. (2012). A simple post-hoc method to add spatial context to predictive species distribution models. *Ecological Modelling*, 228, 17-26.
- Austin, M. (2007). Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological modelling*, 200, 1-19.
- Bai, F., Sang, W., & Axmacher, J. (2011). Forest vegetation responses to climate and environmental change: A case study from Changbai Mountain, NE China. *Forest Ecology and Management*, 262, 2052-2060.
- Barvea, N., Barvea, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Mahera, S., Peterson, A., . . . Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222, 1810–1819.

- Bolliger, J., Kienast, F., & Zimmermann, N. (2000). Risks of global warming on montane and subalpine forests of Switzerland - a modeling case study. *Regional Environmental Change*, 1, 99-111.
- Buckland, S., & Elston, D. (1993). Empirical-models for the spatial-distribution of wildlife. *Journal of Applied Ecology*, 30, 478-495.
- CABI. (2002). *Pines of silvicultural importance*. Londres: CAB International, Forestry Compendium.
- Ciesla, W. (1995). *Cambio climático, bosques y ordenamiento forestal, una visión de conjunto*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37-46.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (s.f.). *Fichas técnicas de reforestación*. Recuperado el 15 de Octubre de 2012, de <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/reforestacion/fichas-tecnicas>
- Del Castillo, R., Pérez, J., Vargas, G., & Rivera, R. (2004). Coníferas. En A. García-Mendoza, M. Ordóñez, & M. Briones-Salas (Edits.), *Biodiversidad de Oaxaca* (págs. 141-158). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza, World Wildlife Fund.
- Dobbertin, M., Hilker, N., Rebetz, M., Zimmermann, N., Wohlgemuth, T., & Rigling, A. (2005). The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland - the result of climate warming? *International Journal of Biometeorology*, 50, 40-47.
- Elith, J., Phillips, S., Hastie, T., Dudík, M., En Chee, Y., & Yates, C. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43-57.
- Engler, R., Randin, C., Vittoz, P., Czaka, T., Beniston, M., Zimmermann, N., & Guisan, A. (2009). Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? *Ecography*, 32, 34-45.
- ESRI (Environmental Systems Resource Institute). (2010). ArcMap 10.0 ESRI. Redlands, California.

- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., & Romero-Centeno, R. (2012). *Atlas Climático Digital de México (versión 2.0)*. (Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua) Recuperado el 06 de Noviembre de 2012, de <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Fielding, A., & Bell, J. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38-49.
- Forbes, A. (1995). Classification-algorithm evaluation performance-measures based on confusion matrices. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 11, 189–206.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación de Köppen* (Quinta ed.). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- García-Mendoza, A., & Meave, J. (Edits.). (2011). *Diversidad florística de Oaxaca: de musgos a angiospermas (colecciones y lista de especies)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- García-Mendoza, A., Ordóñez, M., & Briones-Salas, M. (Edits.). (2004). *Biodiversidad de Oaxaca*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza, World Wildlife Fund.
- Gastón, A., & García-Viñas, J. (2011). Modelling species distributions with penalised logistic regressions: A comparison with maximum entropy models. *Ecological Modelling*, 222, 2037-2041.
- Gómez, J., A., M., Tinoco, J., Toledo, M., Conde, C., & Gay, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. *Atmósfera*, 24(1), 31-52.
- Guisan, A., Edwards, T., & Hastie, T. (2002). Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, 157, 89-100.
- Hanberry, B., Hea, H., & Dey, R. (2012). Sample sizes and model comparison metrics for species distribution models. *Ecological Modelling*, 227, 29–33.
- Hardy, J. (2003). *Climate change causes, effects and solutions*. Londres: Wiley.

- Hernandez, P., Graham, C., Master, L., & Albert, D. (2006). The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29, 773–785.
- Hsu, R., Tamis, W., Raes, N., de Snoo, G., Wolf, J., Oostermeijer, G., & Lin, S. (2011). Simulating climate change impacts on forests and associated vascular epiphytes in a subtropical island of East Asia. *Diversity and Distributions*, 18, 334–347.
- IBM Corp. . (2010). IBM SPSS Statistics para Windows Version 19. Armonk. Nueva York.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (s.f.). *Información Nacional, por entidad federativa y municipios*. Recuperado el 18 de Marzo de 2013, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>
- Innes, J. (1994). Climatic sensitivity of temperate forests. *Environmental Pollution*, 83, 237-247.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). *Climatic Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. (J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken, & K. White, Edits.) New York: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007a). Summary for Policymakers. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, . . . H. Miller (Edits.), *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007b). *Contribution of Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. (M. Parry, O. Canziani, J. Palutiko, P. van der Linden, & C. Hanson, Edits.) New York: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. (C. Field, V. Barros, T. Stocker, D. Qin, D. Dokken, K. Ebi, . . . P. Midgley, Edits.) New York: Cambridge University Press.
- Kullman, L. (2001). 20th Century Climate Warming and Tree-limit Rise in the Southern Scandes of Sweden. *Journal of the Human Environment*, 30(2), 72-80.

- Liu, C., Berry, P., Dawson, T., & Pearson, R. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28, 385-393.
- Martin, T., & Maron, J. (2012). Climate impacts on bird and plant communities from altered animal–plant interactions. *Nature Climate Change*, 2, 195-200.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A., Servín, J., & Kiff, L. (2006). Ecological niche modelling and prioritizing areas for species reintroductions. *Oryx*, 40, 411-418.
- Mateo, R., Felicísimo, A., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista sintética de Historia Natural*, 84, 217-240.
- Meineri, E., Skarpaas, O., & Vandvik, V. (2012). Modeling alpine plant distributions at the landscape scale: Do biotic interactions matter? *Ecological Modelling*, 231, 1-10.
- Moore, B., & Allard, G. (2008). *Los impactos del cambio climático en la sanidad forestal*. Roma: FAO.
- Mouton, A., De Baets, B., & Goethals, P. (2012). Ecological relevance of performance criteria for species distribution models. *Ecological Modelling*, 221, 1995–2002.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., . . . Sa. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Nogués-Bravo, D. (2009). Predicting the past distribution of species climatic niches. *Global Ecology and Biogeography*, 18, 521-531.
- Oltchev, A., Ibrom, A., Morgenstern, K., H., K., & Gravenhorst, G. (1999). Evaluation of the Response of a Spruce Forest Ecosystem on Climatic Changes: Results of Modelling Experiments. *Physics and Chemistry of the Earth*, 24(1), 103-110.
- Ortíz-Medrano, A., Moreno-Letelier, A., & Piñero, D. (2008). Fragmentación en las poblaciones mexicanas de *Pinus ayacahuite* var. *ayacahuite*. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 83, 25-36.
- Peters, R. (1990). Effects of global warming on forest. *Forest Ecology and Management*, 35, 13-33.
- Peterson, A., Tian, H., Martínez-Meter, E., Soberón, S., Sánchez-Cordero, V., & Huntley, B. (2005). Modeling distributional shifts of individual species and biomes. En T. Lovejoy, & L. Hannah (Edits.), *Climate Change and Biodiversity* (págs. 211-231). New Heave: Yale University Press.

- Peterson, A. (2001). Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor*, 103, 599-605.
- Peterson, A. (2003). Predicting the geography of species invasions via ecological niche modeling. *Quarterly Review of Biology*, 78, 419-433.
- Peterson, A., Ortega-Huerta, M., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeler, R., & Stockwell, D. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416, 626-629.
- Peterson, A., Sánchez-Cordero, V., Ben-Bear, C., & Ramsey, J. (2002). Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 8, 662-667.
- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- Puhe, J., & Ulrich, B. (2001). *Global climate change and humans impacts on forest ecosystems*. Alemania: Springer.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F., Lambin, E., . . . Falkenm. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.
- Rojas-Soto, O., Sosa, V., & Ornelas, J. (2012). Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation*, 21, 2671-2690.
- Romero, S. (2006). Revisión taxonómica del complejo acutifoliae de Quercus (Fagaceae) con énfasis en su representación en México. *Acta botánica mexicana*, 76, 1-45.
- Saupe, E., Barve, V., Myers, C., Soberón, J., Barve, N., Hensz, C., . . . Lira-Noriega, A. (2012). Variation in niche and distribution model performance: The need for a priori assessment of key causal factors. *Ecological Modelling*, 238, 11-22.
- SEMARNAT-INECC. (2012). *México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: SEMARNAT-INECC.
- Smith, J. (1997). Setting priorities for adapting to climate change. *Global Environmental Change*, 7(3), 251-264.
- Smith, T., & Smith, R. (2007). *Ecología* (Sexta ed.). Madrid: Pearson.
- Soberón, J., & Peterson, A. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.

- Stankowski, P., & Parker, W. (2012). Species distribution modelling: Does one size fit all? A phytogeographic analysis of *Salix* in Ontario. *Ecological Modelling*, 221, 1655–1662.
- Stankowski, P., & Parker, W. (2011). Future distribution modelling: A stitch in time is not enough. *Ecological Modelling*, 222, 567–572.
- Stanton-Geddes, J., Tiffin, P., & Shaw, R. (2012). Role of climate and competitors in limiting fitness across range edges of an annual plant. *Ecology*, 93(7), 1604-1613.
- Trejo, I. (2004). Clima. En A. García-Mendoza, M. Ordóñez, & M. Briones-Salas (Edits.), *Biodiversidad de Oaxaca* (págs. 67-85). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza, World Wildlife Fund.
- Trejo, I., Martínez-Meyer, E., Calixto-Pérez, E., Sánchez-Colón, S., Vázquez de la Torre, R., & Villers, L. (2011). Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México. *Atmósfera*, 24(1), 1-14.
- Valencia, S., & N., N. (2004). Encinos. En A. García-Mendoza, M. Ordóñez, & M. Briones-Salas (Edits.), *Biodiversidad de Oaxaca*. (págs. 219–225). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza, World Wildlife Fund.
- Vicente-Serrano, S., Lasanta, T., & Gracia, C. (2010). Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 614–628.
- Villers, L., & Trejo, I. (1998). El impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia*, 23, 10-19.
- Villers, L., & Trejo, I. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*, 9, 87-93.
- Villers, L., & Trejo, I. (2000). El cambio climático y la vegetación. En C. Gay (Ed.), *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (págs. 239-254). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program.
- Villers, L., & Trejo, I. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En J. Martínez, & A. Fernández (Edits.), *Cambio climático: una visión*

desde México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.

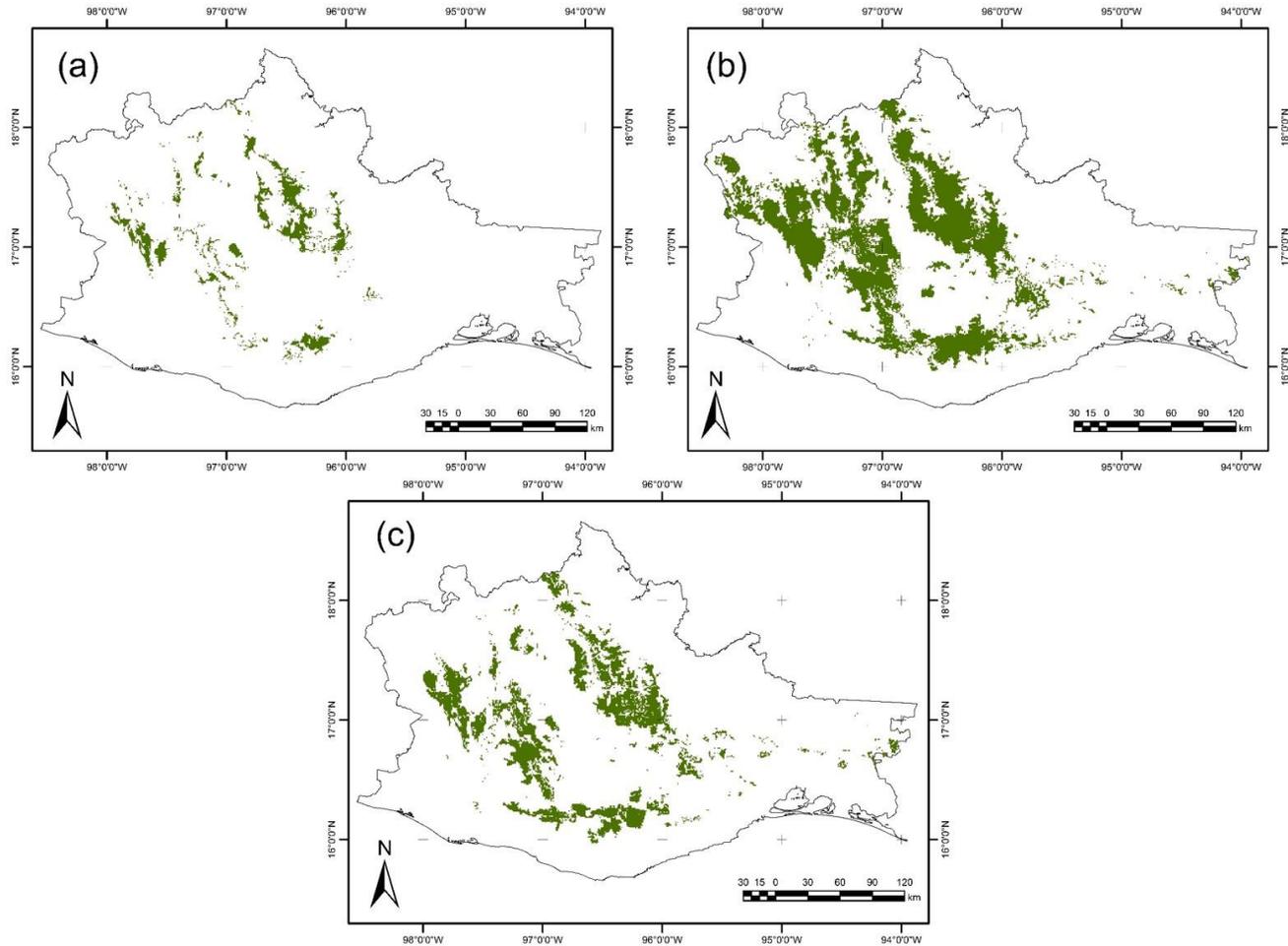
Villers, L., Trejo, I., & Hernández, J. (2006). Sector Bosques. En Instituto Nacional de Ecología, *México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (págs. 88-90). México: INE, SEMARNAT.

Woodall, C., Oswalt, C., Perry, C., Nelson, M., Finley, A., & Westfal, J. (2009). An indicator of tree migration in forests of the eastern United States. *Forest Ecology and Management*, 257, 1434-1444.

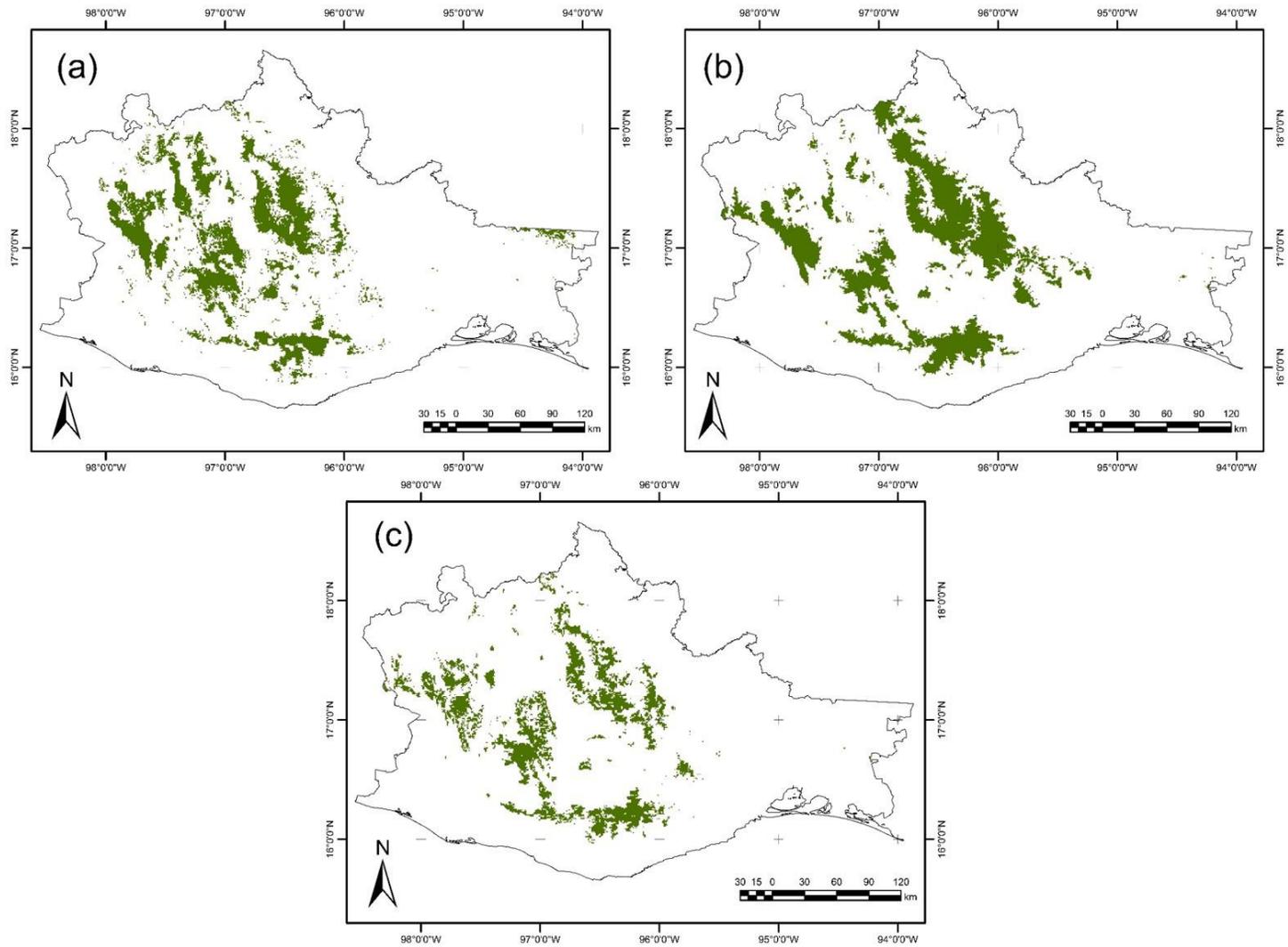
Zaniewski, A., Lehmann, A., & Overton, J. (2002). Predicting species spatial distributions using presence-only data: a case study of native New Zealand ferns . *Ecological Modelling*, 157, 261-280.

Zunino, M., & Zullini, A. (2003). *Biogeografía la dimensión espacial de la evolución* . México: Fondo de cultura económica.

ANEXO 1



Áreas de distribución potencial de *P. ayacahuite* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).



Áreas de distribución potencial de *P. ayacahuite* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).

Condiciones preferenciales para *P. ayacahuite* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los tipos de datos utilizados.

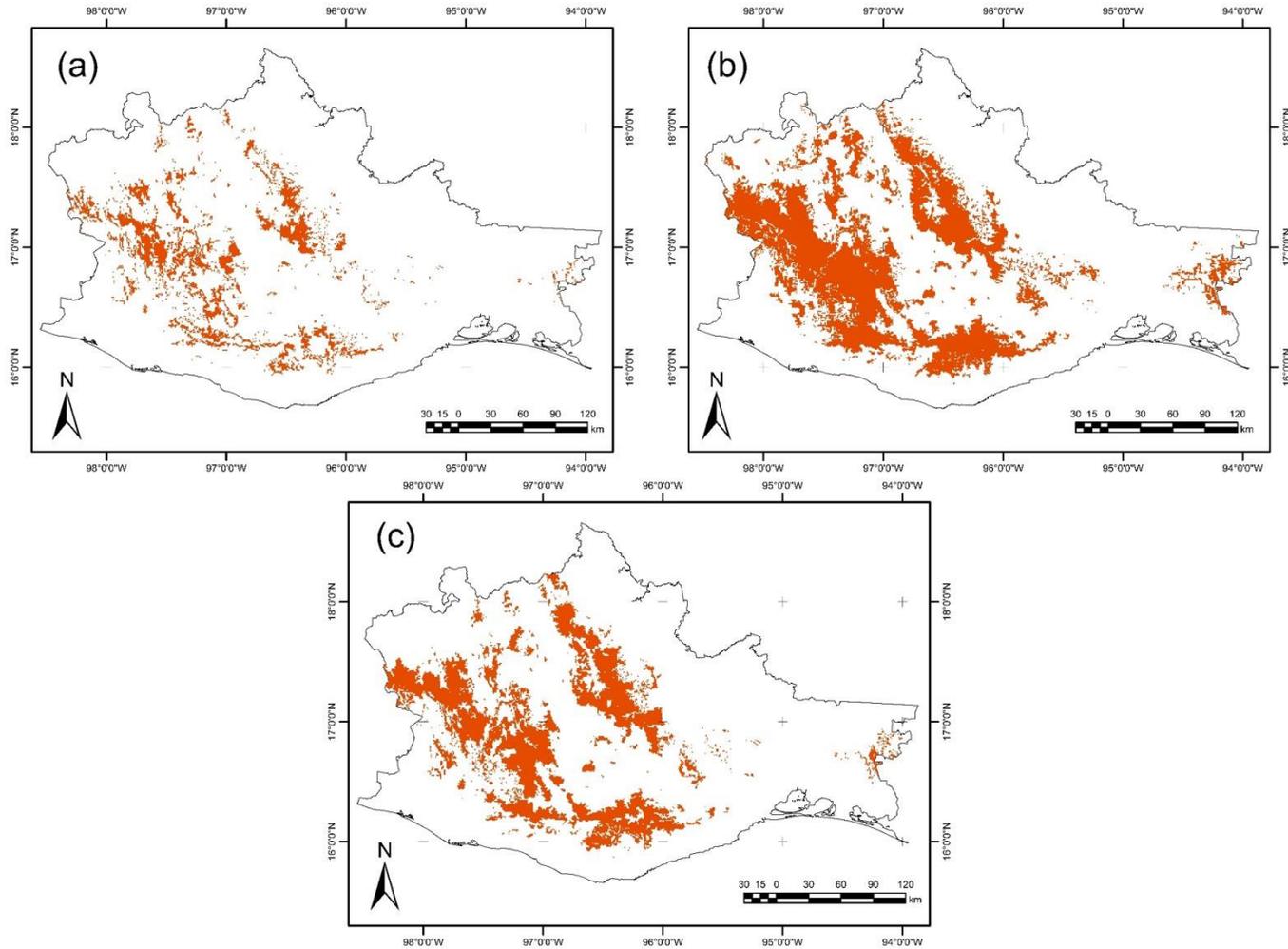
Variables ambientales	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Tipo de clima	Templado subhúmedo (v)2, Templado húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)1	Templado subhúmedo (v)2, Templado húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1	Templado subhúmedo (v)2, Templado húmedo (v), Cálido subhúmedo (v)1, Semicálido húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (i), Templado subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)0, Semiárido templado (v)
Tipo de suelo	Phaeozem, Cambisol, Acrisol, Leptosol, Regosol, Luvisol, Gleysol, Umbrisol	Luvisol, Acrisol, Phaeozem, Leptosol, Cambisol, Regosol, Phaeozem	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol, Acrisol, Umbrisol
Altitud (m)	1165-3698	266-3615	100-3660

((v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja).

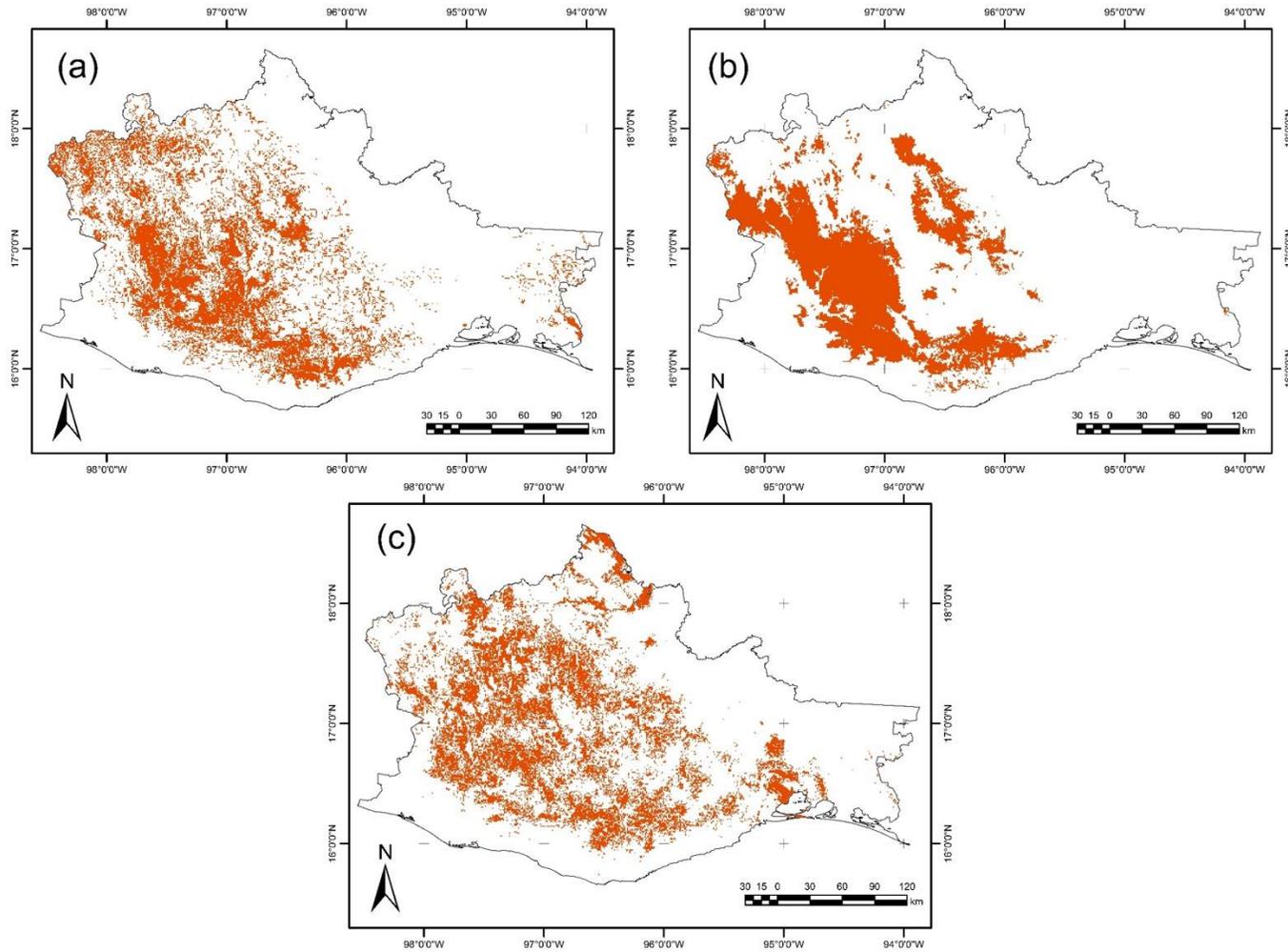
Condiciones preferenciales para *P. ayacahuite* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los tipos de datos utilizados.

Variables ambientales		Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Parámetros bioclimáticos	Temperatura media anual (°C)	7.5-26.8	7.5-22.3	7.5-23.4
	T. máxima del mes más cálido (°C)	14.9-34.5	14.9-32.4	14.9-31.8
	T. mínima del mes más frío (°C)	0.7-17.7	0.7-12.4	0.7-14.2
	T. promedio del trimestre más lluvioso (°C)	7.1-26.5	7.1-22.6	7.1-23
	T. promedio del trimestre más cálido (°C)	8.2-27.3	8.2-23.8	8.2-23.9
	T. promedio del trimestre más frío (°C)	7.7-25.7	7.7-20.1	7.7-19.9
	Precipitación anual (mm)	425-4111	586-2662	647-3181
	P. del mes más lluvioso (mm)	96-712	120-570	135-666
	P. del mes más seco (mm)	0-94	2-47	1-69
	P. del trimestre más lluvioso (mm)	213-1977	286-1428	312-1827
	P. del trimestre más seco (mm)	2-354	13-152	10-236
	P. del trimestre más cálido (mm)	173-845	197-626	216-715
	P. del trimestre más frío (mm)	3-674	14-222	15-314
Tipo de suelo	Phaeozem, Cambisol, Luvisol, Leptosol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Gleysol,	Phaeozem, Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Acrisol, Vertisol, Fluvisol	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol,	
Altitud (m)	622-3677	969-3698	738-3698	

ANEXO 2



Áreas de distribución potencial de *P. montezumae* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).



Áreas de distribución potencial de *P. montezumae* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).

Condiciones preferenciales para *P. montezumae* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

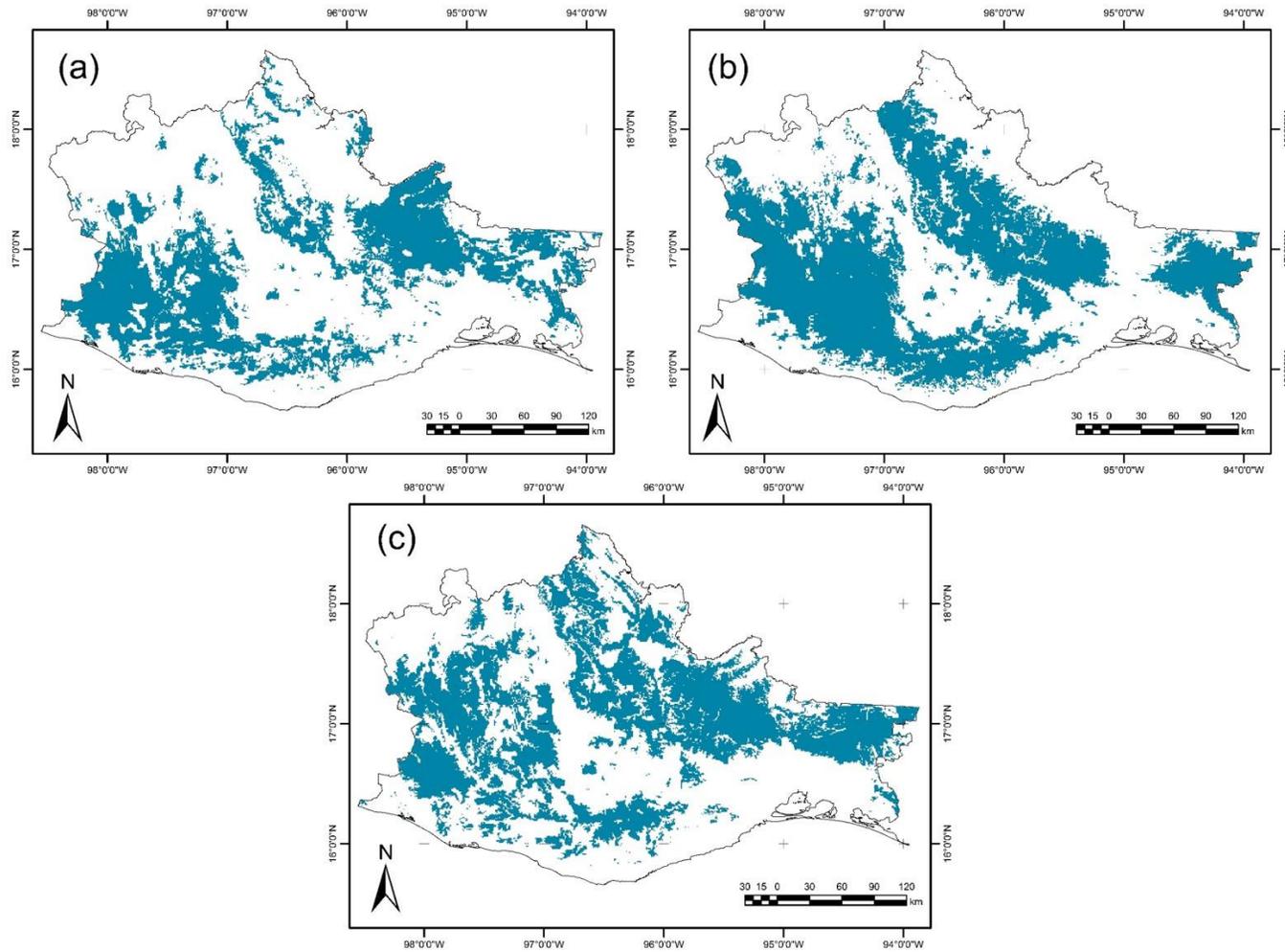
Variables ambientales	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Tipo de clima	Templado subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (v), Semicálido húmedo (v)	Templado subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (v), Semicálido húmedo (v),	Semicálido húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)0, Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Cálido subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)0, Semiárido semicálido (v), Semiárido templado (v)
Tipo de suelo	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Acrisol, Regosol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol, Umbrisol	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Phaeozem, Acrisol, Regosol, Phaeozem, Umbrisol	Leptosol, Phaeozem, Cambisol, Luvisol, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol
Altitud (m)	568-3337	403-3352	277-3660

((v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja).

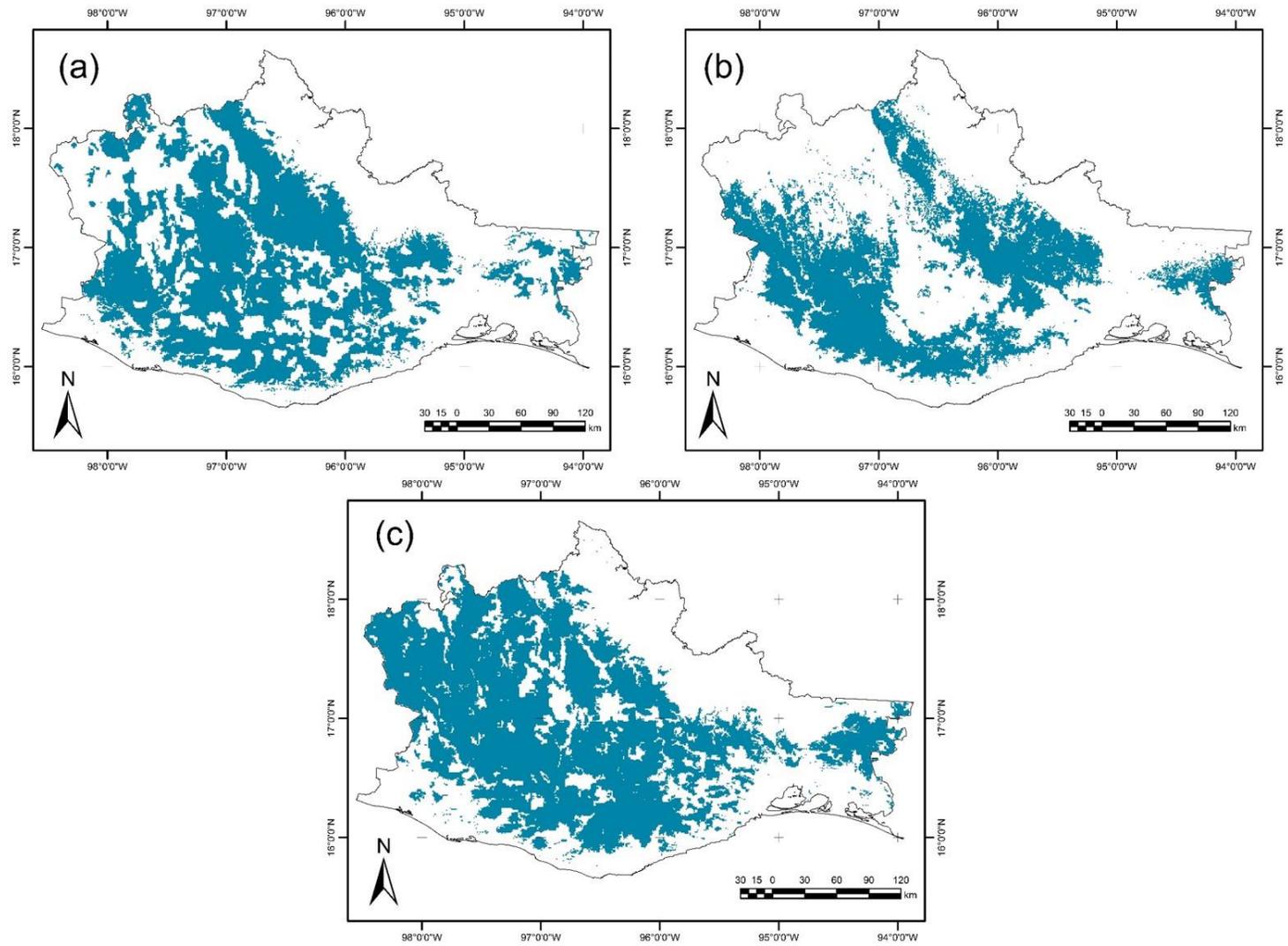
Condiciones preferenciales para *P. montezumae* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

	VARIABLES AMBIENTALES	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Parámetros bioclimáticos	Temperatura media anual (°C)	7.8-27.2	8.7-28.1	7-26.5
	T. máxima del mes más cálido (°C)	14.9-37.1	15.9-37.2	14.9-33.9
	T. mínima del mes más frío (°C)	0.7-19.7	1.5-19.9	0.7-16.3
	T. promedio del trimestre más cálido (°C)	8.3-29	9.4-29.7	8.2-26.7
	T. promedio del trimestre más frío (°C)	7.9-26.1	8.9-26.8	7.7-25.7
	Precipitación anual (mm)	268-3728	291-5072	616-2379
	P. del mes más lluvioso (mm)	68- 679	71-928	135-435
	P. del mes más seco (mm)	0-72	0-103	0-47
	P. del trimestre más seco (mm)	0-252	1-363	6-145
	P. del trimestre más cálido (mm)	94-814	99-1015	200-631
	Tipo de suelo	Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Gleysol, Kastanozem, Chernozem, Acrisol, Umbrisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol	Cambisol, Luvisol, Leptosol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Arenosol, Gleysol, Chernozem, Acrisol, Umbrisol, Kastanozem	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol, Acrisol, Umbrisol
	Altitud (m)	5-3677	5-3559	271-3698

ANEXO 3



Áreas de distribución potencial de *P. oocarpa* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).



Áreas de distribución potencial de *P. oocarpa* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).

Condiciones preferenciales para *P. oocarpa* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

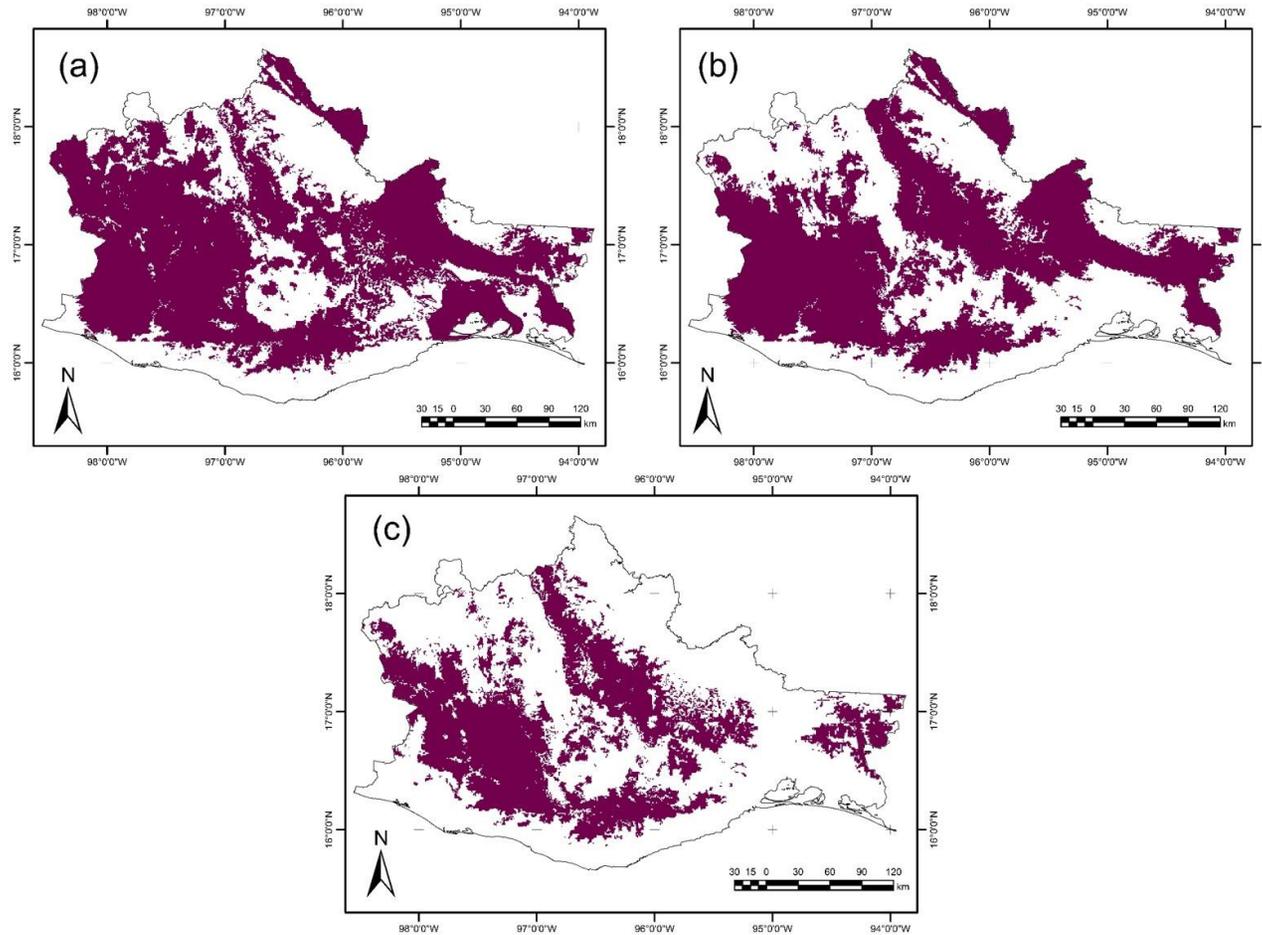
Variables ambientales	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Tipo de clima	Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido húmedo (v), Templado subhúmedo (v)2, Semicálido húmedo (i), Cálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (i), Cálido subhúmedo (v)1,	Semicálido húmedo (v), Templado subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)1, Semicálido húmedo (i), Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Cálido subhúmedo (v)2, Cálido subhúmedo (v)1	Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Semicálido húmedo (v), Templado subhúmedo (v)2, Semicálido húmedo (i), Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Templado subhúmedo (v)1, Cálido subhúmedo (v)2, Cálido subhúmedo (v)1
Tipo de suelo	Regosol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Cambisol, Leptosol, Planosol, Gleysol, Acrisol, Umbrisol	Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol, Acrisol, Umbrisol, Nitisol	Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol, Alisol, Nitisol
Altitud (m)	4-3234	9-3233	48-3233

((v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja).

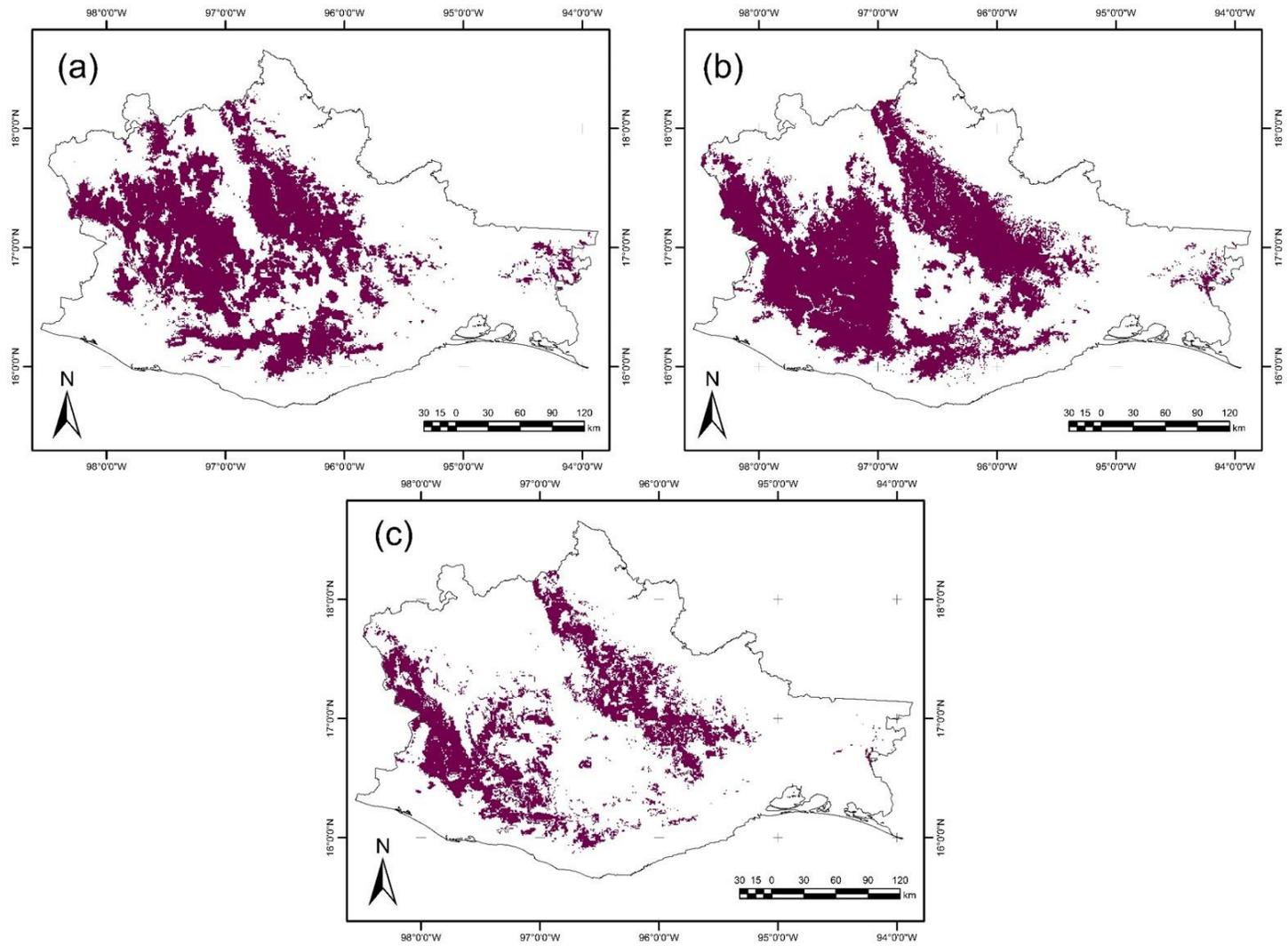
Condiciones preferenciales para *P. oocarpa* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

Variables ambientales		Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Parámetros bioclimáticos	Temperatura media anual (°C)	7.5-27.4	7.5-28	10.9-25.6
	T. máxima del mes más cálido (°C)	14.9-37.1	14.9-37.2	18.4-35.4
	T. mínima del mes más frío (°C)	0.7-18.9	0.7-19.4	2.2-16.8
	T. promedio del trimestre más lluvioso (°C)	7.1-28.3	7.1-28.5	9.5-26
	T. promedio del trimestre más seco (°C)	8.1-27.5	8.1-27.5	10.6-25.8
	T. promedio del trimestre más cálido (°C)	8.2-28.7	8.2-29.2	10.9-27.4
	T. promedio del trimestre más frío (°C)	7.7-26.4	7.7-26.9	9.5-24.2
	Precipitación anual (mm)	268-3281	228-3379	657-5072
	P. del mes más lluvioso (mm)	68-637	61-712	136-928
	P. del mes más seco (mm)	0-69	0-75	0-103
	P. del trimestre más lluvioso (mm)	147-1752	123-1811	335-2495
Tipo de suelo	Regosol, Cambisol, Luvisol, Arenosol, Leptosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol	Leptosol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Cambisol, Gleysol, Kastanozem, Chernozem, Acrisol, Umbrisol, Nitisol, Alisol	Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol	
Altitud (m)	139-3677	423-3677	211-3180	

ANEXO 4



Áreas de distribución potencial de *Q. candicans* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).



Áreas de distribución potencial de *Q. candidans* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).

Condiciones preferenciales para *Q. candicans* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

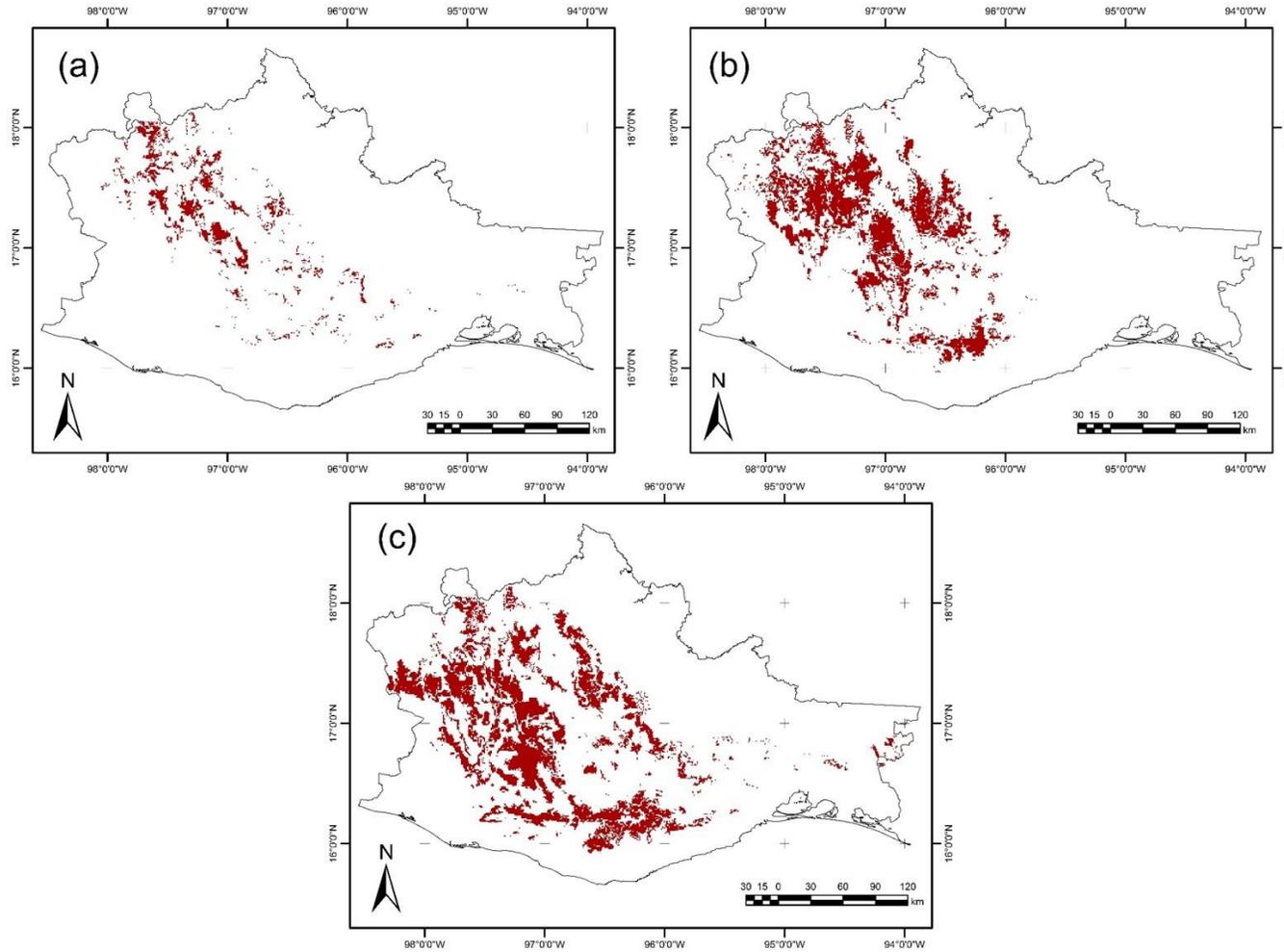
Variables ambientales	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Tipo de clima	Semicálido húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)0, Templado subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)1, Semicálido húmedo (i), Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Templado subhúmedo (v)0	Semicálido subhúmedo (v)2, Templado húmedo (v), Templado subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado húmedo (i), Semicálido húmedo (v), Templado subhúmedo (v)0, Cálido subhúmedo (v)2, Cálido subhúmedo (v)1, Semiárido semicálido (v), Semiárido templado (v)	Semicálido húmedo (v), Semicálido subhúmedo (v)2, Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Semicálido húmedo (i), Semicálido subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)0, Cálido subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)0, Semiárido semicálido (v), Semiárido templado (v)
Tipo de suelo	Leptosol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Cambisol, Gleysol, Acrisol, Umbrisol, Alisol	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Kastanozem, Alisol, Gleysol, Acrisol,	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol, Nitisol, Alisol
Altitud (m)	282-3698	216-3698	161-3660

((v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja).

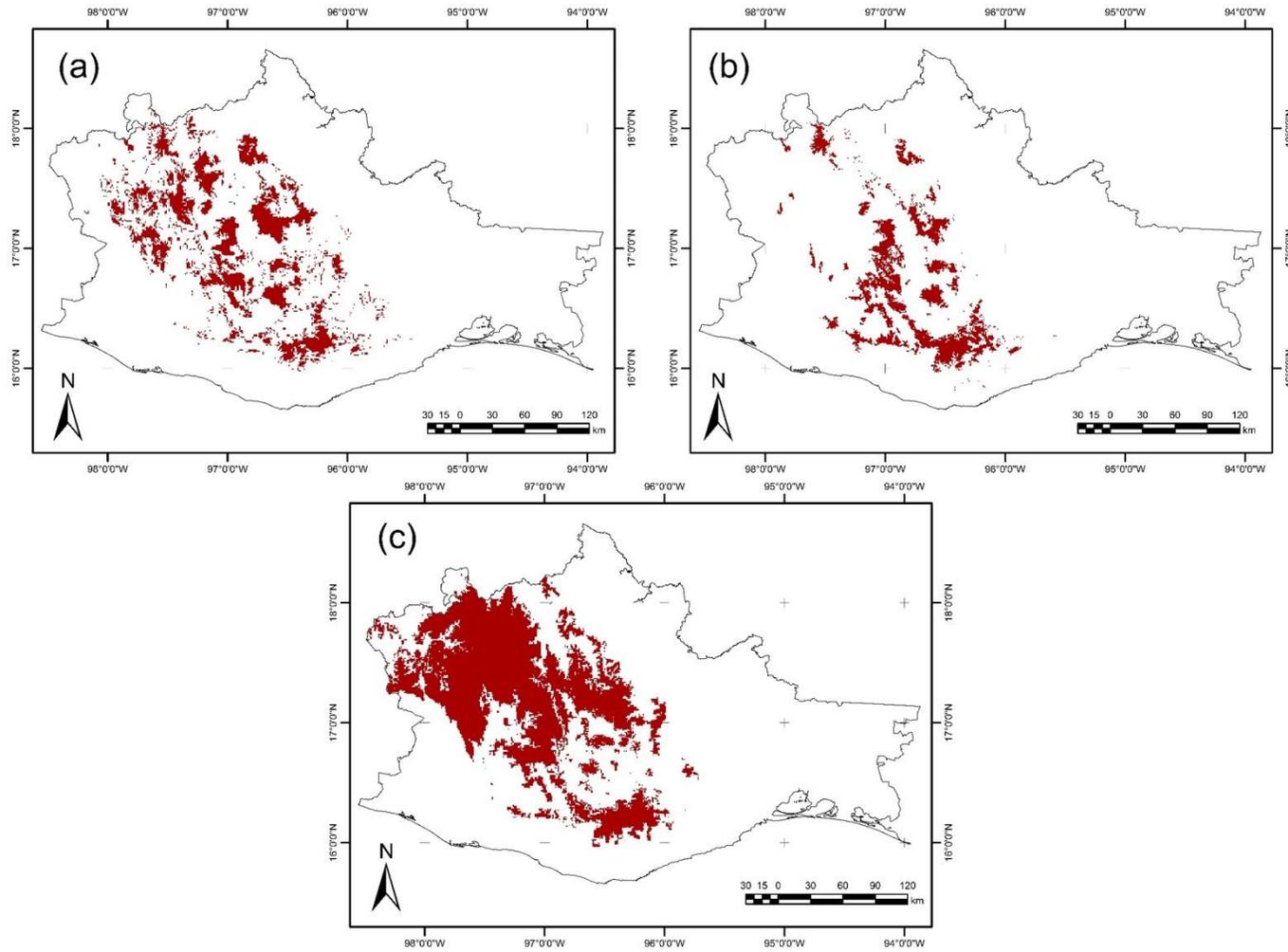
Condiciones preferenciales para *Q. candicans* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

Variables ambientales		Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Parámetros bioclimáticos	Temperatura media anual (°C)	7.5-25.7	10.6-27.3	7.5-26.9
	T. máxima del mes más cálido (°C)	14.9-35.1	18.1-37.1	14.9-37.1
	T. mínima del mes más frío (°C)	0.7-15.7	1.5-17.1	0.7-16.6
	T. promedio del trimestre más lluvioso (°C)	7.1-25.4	9.1-26.9	7.1-26.6
	T. promedio del trimestre más seco (°C)	8.1-25.7	10-27.3	8.1-26.9
	T. promedio del trimestre más cálido (°C)	8.2-26.8	10.1-28.2	8.2-27.7
	T. promedio del trimestre más frío (°C)	7.7-24.1	8.9-25.8	7.7-25.3
	Precipitación anual (mm)	413-4291	583-3532	437-3651
	P. del mes más lluvioso (mm)	93-876	123-728	93-813
	P. del trimestre más lluvioso (mm)	213-2222	320-1879	233-1990
	P. del trimestre más seco (mm)	1-301	6-251	0-255
	P. del trimestre más cálido (mm)	149-916	196-747	167-818
	P. del trimestre más frío (mm)	3-387	12-354	6-353
Tipo de suelo	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol,	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol	Leptosol, Regosol, Cambisol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol,	
Altitud (m)	537-3677	212-3572	277-3698	

ANEXO 5



Áreas de distribución potencial de *Q. uxoris* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).



Áreas de distribución potencial de *Q. uxoris* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los datos de presencia y ausencia (a), datos de presencia (b) y datos de abundancia (c).

Condiciones preferenciales para *Q. uxoris* obtenidas a partir del análisis 1 (tipos de climas) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

Variables ambientales	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Tipo de clima	Templado subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)0, Cálido subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)2	Templado subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)1, Cálido subhúmedo (v)1, Templado subhúmedo (v)0, Semicálido húmedo (v)	Templado subhúmedo (v)2, Templado subhúmedo (v)1, Semicálido subhúmedo (v)2, Semicálido subhúmedo (v)0, Templado húmedo (v), Templado húmedo (i), Semicálido húmedo (v), Templado subhúmedo (v)0, Semiárido templado (v)
Tipo de suelo	Leptosol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Cambisol, Acrisol	Leptosol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Cambisol, Gleysol, Kastanozem, Acrisol, Umbrisol	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Acrisol, Umbrisol
Altitud (m)	594-3047	397-3224	870-3660

((v), con régimen de lluvias en verano; (i), con régimen de lluvias uniformemente repartidas; 2, humedad alta; 1, humedad intermedia; 0, humedad baja).

Condiciones preferenciales para *Q. uxoris* obtenidas a partir del análisis 2 (parámetros bioclimáticos) de acuerdo a los tipo de datos utilizados.

	VARIABLES AMBIENTALES	Presencia y Ausencia	Abundancia	Presencia
Parámetros bioclimáticos	Temperatura media anual (°C)	7.5-23.9	7.5-23.1	10.3-24.3
	T. máxima del mes más cálido (°C)	14.9-35.1	14.9-33.6	17.8-33.2
	T. mínima del mes más frío (°C)	0.7-13.4	0.7-10.7	2.6-15.1
	T. promedio del trimestre más lluvioso (°C)	7.1-23.5	7.1-22.5	10.1-25
	T. promedio del trimestre más frío (°C)	7.7-21.6	7.7-20.1	10.4-23.9
	Precipitación anual (mm)	392-2183	437-2058	391-1977
	P. del mes más lluvioso (mm)	96-395	93-392	105-400
	P. del trimestre más lluvioso (mm)	209-1130	216-1009	202-1061
	P. del trimestre más cálido (mm)	135-597	152-597	153-631
	P. del trimestre más frío (mm)	3-183	7-155	6-80
	Tipo de suelo	Leptosol, Cambisol, Luvisol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Gleysol, Acrisol, Umbrisol	Leptosol, Regosol, Luvisol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Calcisol, Cambisol, Gleysol, Chernozem, Acrisol, Umbrisol	Cambisol, Luvisol, Leptosol, Regosol, Vertisol, Fluvisol, Phaeozem, Gleysol, Acrisol, Umbrisol
	Altitud (m)	905-3677	1290-3698	461-3236