



Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México

Effect of climatic change on the potential distribution of five species of temperate forest trees in Mexico

Erick Guitérrez[✉] e Irma Trejo

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.
[✉] erickeduardoge@gmail.com

Resumen. *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Q. ocoteifolia* son especies que se establecen en altitudes muy elevadas, por lo que predice que serán más sensibles a los cambios del clima en el futuro. Se calculó la probabilidad de establecimiento de cada especie ante determinadas condiciones ambientales, se generaron mapas de distribución potencial, se calculó la superficie total que ocupan en el país y se obtuvo el porcentaje de cambio bajo condiciones de cambio climático, propuestos por 2 modelos de circulación general con 2 escenarios de emisiones. Los resultados muestran que las 5 especies experimentarán reducción en su área de distribución, debido a las modificaciones en temperatura y precipitación. Esto supondría una disminución considerable en sus poblaciones e incluso se predice que ocurrirán algunas extinciones locales.

Palabras clave: *Abies*, establecimiento, *Pinus*, precipitación, *Quercus*, sensibilidad de especies, temperatura.

Abstract. *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* and *Q. ocoteifolia* are species distributed at very high altitudes, so they will be more sensitive to climate change. We calculated the probability of distribution of each species to certain environmental conditions throughout potential distribution maps calculated from the total area occupied in the country and obtained the percentage of change under conditions of climate change proposed by 2 general circulation models with 2 emission scenarios. The results show that the 5 species will experience reduction in its distribution, due to changes in temperature and precipitation. This might be supposed a significant decline in their populations and even predict some local extinctions along their current distribution.

Key words: *Abies*, establishment, *Pinus*, precipitation, *Quercus*, species sensitivity, temperature.

Introducción

El clima es uno de los factores que delimitan la distribución de las plantas, ya que cada especie requiere de ciertas condiciones de temperatura, humedad y luz para germinar, crecer, florecer y fructificar. Cuando los factores climáticos, específicamente la temperatura y la precipitación, exceden el grado de tolerancia de una determinada especie, ésta no puede llevar a cabo su ciclo de vida de manera óptima. Esto se debe a que cada especie tiene un intervalo de tolerancia a diversos factores ambientales (Peters, 1990; Walther et al., 2002; Hardy, 2003; Dawson y Spannagle, 2009).

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la intensa transformación del hombre sobre el medio natural

ha incrementado la emisión de gases de invernadero a la atmósfera, provocando un aumento de la temperatura de la Tierra, particularmente notable en los últimos 100 años (IPCC, 2001, 2007). Debido a estos cambios, se han documentado efectos sobre los sistemas naturales, que no se explican con la variabilidad natural, sino que se relacionan con el calentamiento global del planeta (Dixon et al., 1996; Burroughs, 2001; IPCC, 2007) y que se añaden al impacto directo de pérdida de especies, debido al cambio de uso del suelo (IPCC, 2002).

Se espera que el efecto del cambio climático sobre los ecosistemas se vea reflejado en alteración en la distribución y abundancia de las especies (Hughes, 2000; Peterson et al., 2005; Root et al., 2005; Parmesan, 2006) o en la desaparición directa de algunas especies y poblaciones (Walther et al., 2002; Thomas et al., 2004). Las distintas especies tenderían a modificar su distribución hacia latitudes y altitudes diferentes a las que se encuentran hoy en día (Ciesla, 1995; Walther et al., 2005; Parmesan,

2006; Gavilán, 2008). Sin embargo, las modificaciones en el clima podrían exceder su habilidad de migrar o de sobrevivir en las nuevas condiciones ambientales (Beniston, 1994; Smith, 1997; Gray, 2005; Gavilán, 2008). Estos cambios podrían alterar la sustentabilidad de una región, debido a la modificación en la composición de especies del ecosistema (Ciesla, 1995; Gray, 2005; Walther et al., 2005; Parmesan, 2006).

Particularmente, este efecto será más severo para las especies que se encuentren en ecosistemas geográficamente confinados, como las montañas, ya que serán más sensibles a los cambios en las condiciones climáticas (Gavilán, 2008; Dawson y Spannagle, 2009).

Los objetivos de este trabajo son reconocer las condiciones climáticas en donde se establecen actualmente 5 especies arbóreas de importancia en México (*Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schldt., *Pinus hartwegii* Lindl., *Abies hickelii* Flous y Gausson, *Quercus laurina* Bonpl. y *Quercus ocoteifolia* Liebm.), y evaluar su sensibilidad ante el cambio climático, a partir de la aplicación de métodos estadísticos que permitan describir las probabilidades de ocurrencia de las especies ante condiciones climáticas determinadas. Ya que el conocer las afinidades y patrones de comportamiento de las especies en relación con las condiciones climáticas, puede tener repercusiones prácticas importantes, esencialmente en el manejo y conservación de los recursos vegetales.

Materiales y métodos

Selección de especies. Se seleccionaron 5 especies que se distribuyen en áreas montañosas México: *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Q. ocoteifolia*. Las especies seleccionadas, además de su importancia biológica y ecológica, también son de importancia forestal; todas estas especies se encuentran geográficamente confinadas a las partes más altas de las montañas en sus áreas de distribución y se anticipa que estas áreas se reducirán como resultado del cambio en las condiciones climáticas. En el caso específico de *A. hickelii*, es una especie que se encuentra en peligro de extinción (Semarnat, 2010), por lo que la hace más sensible al cambio climático.

Localización actual de las especies. Se utilizó la georreferencia de los puntos de colecta disponibles en diversas bases de datos: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Inegi; Global Biodiversity Information Facility, GBIF; y ejemplares de herbario: MEXU, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México; FCME, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México;

ENCB, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. Para el caso de los ejemplares de herbario que no contaban con una georreferencia, se localizó el punto de colecta en las cartas topográficas del Inegi (escala 1:50000). Se hizo una revisión exhaustiva de las bases y se depuraron los datos duplicados y los puntos de colecta que no contaban con suficiente información para ser georreferenciados.

Intervalos óptimos de establecimiento. Para obtener los parámetros climáticos, de promedios mensuales y anuales de temperatura y precipitación, se utilizaron los datos provenientes del escenario base que se encuentra en el Atlas Climático Digital de México elaborado por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (Fernández-Eguiarte et al., 2010). El escenario base toma en cuenta datos climáticos del periodo comprendido entre los años 1950 al 2000 y está disponible a una resolución espacial de 926 m.

Se utilizó un sistema de información geográfica (ArcGis 9.3) para llevar a cabo una superposición de capas y así obtener el valor correspondiente de las variables climáticas seleccionadas para cada uno de los puntos de colecta de las especies. Para evitar los datos anómalos, debido a problemas en la georreferencia, se eliminaron los datos extremos de las variables climáticas detectados por medio de gráficos de caja y bigote, con el uso del software PASW Statistics, versión 18. Se realizaron las pruebas de simetría y curtosis propuestas por D'Agostino (Zar, 1999) para comprobar que las variables climáticas presentaban una distribución normal para el cálculo posterior de probabilidades. Debido a que los datos crudos no presentaron dicha forma de distribución, se hizo una transformación logarítmica de los datos con la fórmula: $X' = \log_{10}(X_i + 1)$. Las variables climáticas que presentaron una distribución normal después de haber sido transformadas, fueron la temperatura media anual y precipitación anual.

Para obtener los intervalos óptimos de los parámetros climáticos de cada una de las especies, se tomó en cuenta el valor menor de los datos y a éste se le sumó el valor de w , que representa la amplitud de intervalo ($w = R/k$, donde: $R = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}$; $k = 1 + 3.322 \log n$). Dicha suma se realizó hasta que todos los datos estuvieron dentro de alguno de los intervalos resultantes. Después se calculó la probabilidad de cada uno de los intervalos, por medio de la aplicación de una Z estandarizada ($Z = (X_i - \mu) / \sigma$; donde: $Z = \text{valor estandarizado}$; $\mu = \text{media}$; $\sigma = \text{desviación estándar}$). En este proceso se calculó el valor de Z estandarizada para el límite inferior y superior del intervalo. Para obtener sólo una probabilidad por intervalo de clase, se restó a la probabilidad Z del límite inferior del intervalo, la probabilidad Z del límite superior. Una

vez obtenidas las probabilidades de cada intervalo, los valores se transformaron de acuerdo con la siguiente fórmula: valor del intervalo = $10^{X'} - 1$ (donde X' = valor logarítmico del límite inferior o superior del intervalo que se desea transformar). Después de que se calcularon todos los intervalos de clase por variable climática, se obtuvieron los intervalos óptimos de temperatura media anual y precipitación anual mediante la selección de los intervalos con probabilidades mayores o iguales a 0.1.

Proyecciones de cambio climático. Para analizar los cambios en las condiciones climáticas se utilizaron las capas de temperatura media y precipitación anual propuestos por los 2 modelos de circulación general disponibles en el Atlas Climático Digital de México (Fernández-Eguiarte et al., 2010). Uno es el modelo alemán (MPIECHAM5) y el otro el modelo inglés (UKMOHADGEM1). Cada uno de ellos se proyectó bajo 2 escenarios de emisiones; A2, emisiones altas de gases de efecto invernadero, y B2, emisiones de gases de efecto invernadero menores que el escenario A2; y aplicados en un horizonte de tiempo a 2050. Las proyecciones de cambio climático se encuentran disponibles a una resolución espacial de 926 m en el Atlas Climático Digital del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/uniatmos.html>). Con ayuda del SIG (ArcGis 9.3), se obtuvieron los datos de temperatura y precipitación para cada punto de colecta de cada una de las especies, de acuerdo con los cambios propuestos por cada uno de los modelos utilizados.

Distribución potencial. Por medio de un SIG se generaron los mapas de distribución potencial de cada especie y se calculó la superficie total que ocupa cada una de ellas en el país. Para obtener esta información, se utilizaron los intervalos óptimos obtenidos anteriormente y se seleccionaron las zonas del país que cumplieran con las temperaturas y precipitación deseadas. Esto fue tanto para el escenario base como para las diferentes proyecciones de cambio climático. Para evaluar el impacto del cambio climático en la distribución de las especies arbóreas, se

obtuvo el porcentaje de cambio para cada proyección de cambio utilizado, modelos y escenarios de emisiones, por medio de la siguiente fórmula: % de cambio = $[(S_1 - S_0) / S_0] * 100\%$, donde S_0 es la superficie total que ocupan en el país según el escenario base y S_1 es la superficie total que ocupan en el país bajo las condiciones de cambio.

Resultados

La especie con mayor número de registros de colecta fue *Pinus hartwegii* (748) en contraste con *Q. ocoteifolia* (54), debido también a la limitada distribución de la especie. Todas las especies se establecen en zonas con temperaturas que van de 9.9 a 16.6° C de media anual, con más del 40% de probabilidad de encontrarlas entre estos valores. En relación con los intervalos óptimos de establecimiento para las variables climáticas, la amplitud en la temperatura va de 3.1 a 4.5° C. *Pinus ayacahuite* presentó el intervalo óptimo de ocurrencia más amplio (4.5° C); *Pinus hartwegii* se encuentra en promedio en las temperaturas más bajas y para *Abies hickelii* el intervalo es el más restringido de las especies analizadas (Cuadro 1).

En cuanto a condiciones de humedad, *A. hickelii* y *Q. ocoteifolia* son las especies que se distribuyen en sitios con mayor precipitación, 1 332 a 1 792 mm de lluvia anual. En contraste, *P. hartwegii*, *P. ayacahuite* y *Q. laurina* se pueden encontrar en zonas con lluvia anual desde los 700 mm.

Los mapas de distribución potencial obtenidos a partir de las probabilidades de presencia de acuerdo con las preferencias de temperatura media y lluvia anual, muestran que de las 5 especies estudiadas, *P. ayacahuite* (Cuadro 2) es la que podría ocupar la mayor superficie en el país con 9.93×10^6 ha, distribuyéndose mayormente en la parte noroeste y centro del país (Fig. 1), mientras que *Q. ocoteifolia* (Cuadro 2) es la especie que espacialmente se encontraría más restringida, con una superficie de 0.27×10^6 ha, concentradas, principalmente, en el sur del país (Fig. 3).

Cuadro 1. Intervalos óptimos de temperatura media anual y precipitación anual por especie, con sus respectivas probabilidades de establecimiento [p]

| Especie | Número de registros | Temperatura media anual (° C) y [p] | Precipitación anual (mm) y [p] |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <i>Pinus ayacahuite</i> | 458 | 11.8-16.3 [0.52] | 733-1269 [0.54] |
| <i>Pinus hartwegii</i> | 748 | 9.9-13.0 [0.54] | 657-1019 [0.56] |
| <i>Abies hickelii</i> | 83 | 11.1-13.7 [0.42] | 1332-1591 [0.41] |
| <i>Quercus laurina</i> | 724 | 12.1-16.5 [0.57] | 815-1289 [0.53] |
| <i>Quercus ocoteifolia</i> | 54 | 11.8-14.9 [0.57] | 1418-1792 [0.41] |

Cuadro 2. Área potencial de las especies analizadas de acuerdo con el escenario base y a las proyecciones de cambio climático. Se presenta el área total que ocupan en hectáreas (ha) con sus porcentajes de cambio

| Especie | Escenario base | HADGEM1 A2 | | HADGEM1 B2 | | MPIECHAM5 A2 | | MPIECHAM5 B2 | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | 10 ⁶ ha | 10 ⁶ ha | % de cambio | 10 ⁶ ha | % de cambio | 10 ⁶ ha | % de cambio | 10 ⁶ ha | % de cambio |
| <i>P. ayacahuite</i> | 9.93 | 6.49 | -35 | 7.88 | -21 | 5.35 | -46 | 6.55 | -34 |
| <i>P. hartwegii</i> | 3.61 | 0.73 | -80 | 0.82 | -77 | 0.51 | -86 | 0.64 | -82 |
| <i>A. hickelii</i> | 0.29 | 0.07 | -76 | 0.14 | -50 | 0.06 | -79 | 0.12 | -58 |
| <i>Q. laurina</i> | 7.91 | 4.64 | -41 | 6.42 | -19 | 4.13 | -48 | 5.15 | -35 |
| <i>Q. ocoteifolia</i> | 0.27 | 0.11 | -60 | 0.15 | -44 | 0.08 | -69 | 0.12 | -54 |

La áreas que pueden ocupar *P. ayacahuite* (Fig. 1) y *Q. laurina* (Fig. 3) son muy similares y son los sistemas montañosos ubicados en las sierras Madre Occidental, Madre Oriental y el Eje Neovolcánico, principalmente. *Pinus hartwegii* se presenta en áreas potenciales de distribución en zonas con mayor altitud en estas serranías (Fig. 2). *Quercus ocoteifolia* requiere condiciones de mayor humedad, lo que hace que su área potencial de establecimiento se concentre en sitios que combinen temperaturas bajas con mayor lluvia, localizados en el centro sur del país (Fig. 3).

Los resultados muestran que las 5 especies experimentarán reducciones en sus áreas de distribución potencial, debido a las modificaciones propuestas en temperatura y precipitación. Los cambios más notables se observaron en *P. hartwegii*, seguido de *A. hickelii* y *Q. ocoteifolia*, con reducciones de hasta 86, 79 y 69%, respectivamente, para el modelo MPIECHAM5 bajo un escenario de emisiones tipo A2 proyectado al año 2050 (Cuadro 2).

La especie más afectada es *P. hartwegii*, ya que de acuerdo con todos los modelos aplicados, su área de distribución se reduce alrededor del 80%, comparada con la superficie potencial actual. Por su parte, *P. ayacahuite* y *Q. laurina* muestran reducción en el área de distribución en valores que van de 34 a 48% y, en el caso del modelo HADGEM1 (B2), las pérdidas de superficie potencial fluctúan alrededor del 20%. Para *A. hickelii* y *Q. ocoteifolia* el área potencial presenta pérdidas que van del 44 al 79% de la superficie original, dependiendo del modelo y escenario aplicado.

Discusión

Los resultados muestran que las modificaciones en las variables climáticas, propuestas por los modelos de circulación general y escenarios utilizados en este estudio,

podrían tener efectos en la distribución de las 3 especies de coníferas y 2 encinos analizados. Estas 5 especies actualmente se encuentran en las partes altas de las montañas de México, condición que las hace susceptibles a ser afectadas por el posible cambio climático de acuerdo con otras proyecciones (Nogués-Bravo et al, 2007).

Conocer las condiciones actuales en las que se distribuyen las especies, brinda información importante para identificar espacialmente las áreas que contienen las características ambientales que éstas requieren. Si bien las especies tienen capacidad de cambiar y adaptarse, la presencia de las poblaciones en ciertas condiciones, son un indicador de sus preferencias y requerimientos. Esto es importante, debido a que las tolerancias entre las especies son distintas y esto hace que algunas sean más vulnerables al cambio climático (Thuiller et al., 2011).

En el contexto del cambio climático actual, las especies tendrán que enfrentar diversas presiones del ambiente, tales como incrementos en la temperatura y variaciones en los ciclos hidrológicos y responder en tiempos relativamente cortos (Villers y Trejo, 2000). Las especies se han expuesto a cambio del clima a lo largo de su historia evolutiva, pero el ritmo de los cambios actuales supera por mucho los patrones del pasado (Thuiller et al., 2011). Debido a esto, la permanencia de las especies ante el cambio climático dependerá de su habilidad de adaptación y de una migración rápida a lugares con condiciones climáticas óptimas (Peters, 1990; Gray, 2005).

Sin embargo, se sabe que los cambios en la distribución de la vegetación ocurren de manera lenta, ya que suelen ser procesos que tardan cientos o miles de años (Hardy, 2003), además de que las nuevas zonas podrían no ser edáficamente apropiadas para el establecimiento de algunas especies (McKenney et al., 2007). Además, la capacidad de respuesta de cada especie se vería afectada por el estado de conservación de la vegetación y por factores como la deforestación (Villers y Trejo, 2000).

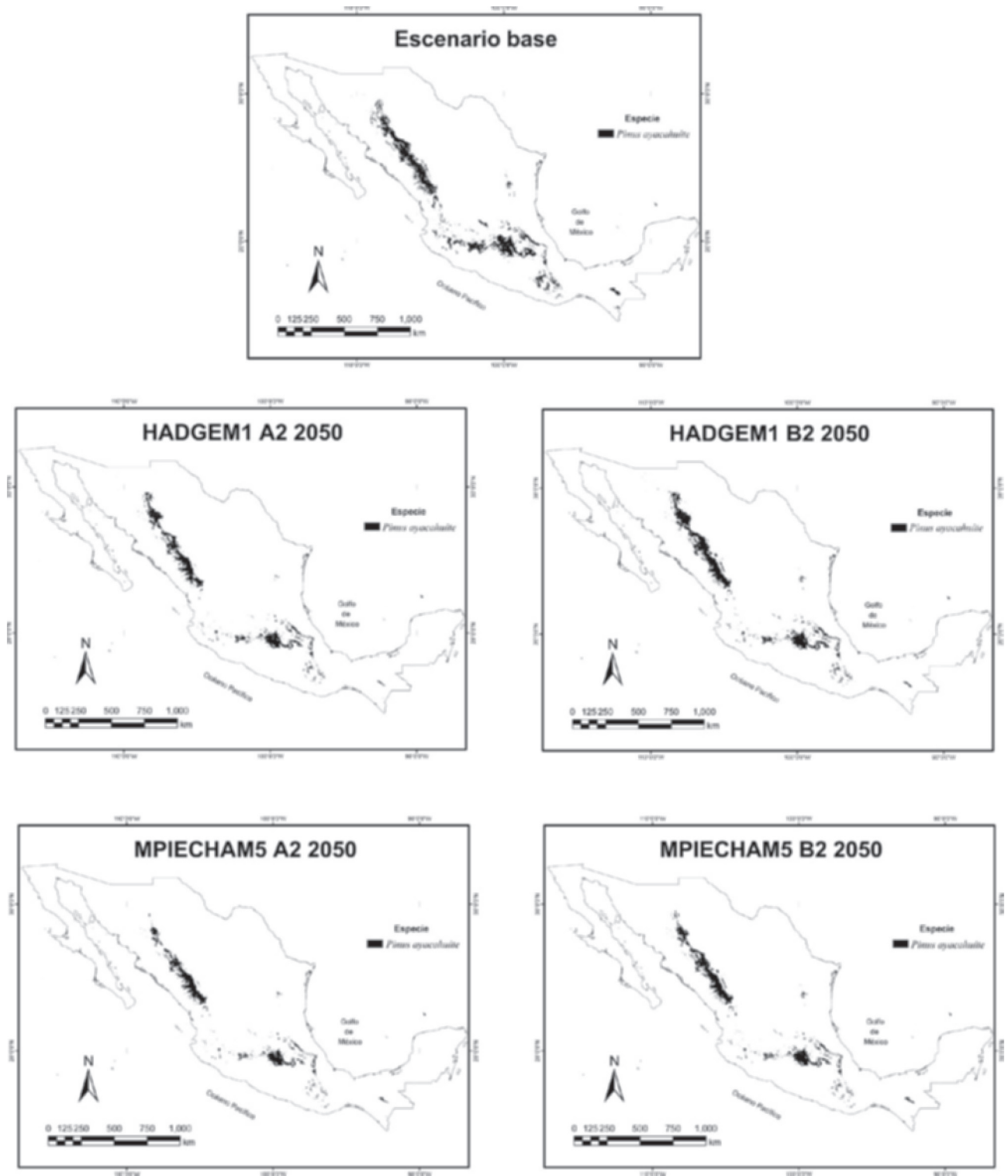


Figura 1. Mapas de distribución potencial de *Pinus ayacahuite* para el escenario base y 2 modelos de circulación general (MPIECHAM5 y HADGEM1), con 2 escenarios de emisiones (A2 y B2) y horizonte de tiempo 2050.

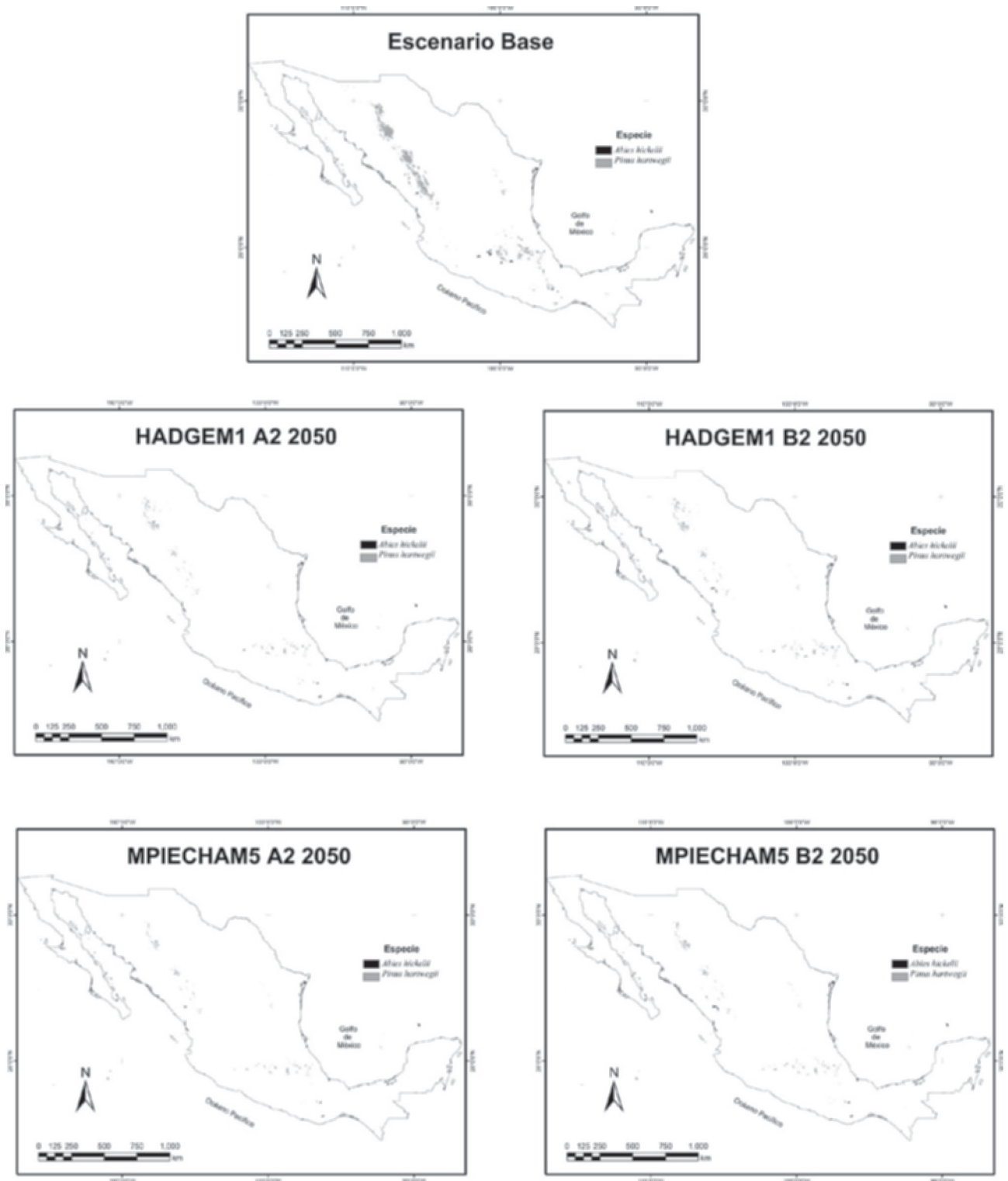


Figura 2. Mapas de distribución potencial de *Abies hickelii* (negro) y *Pinus hartwegii* (gris) para el escenario base y 2 modelos de circulación general (MPIECHAM5 y HADGEM1), con 2 escenarios de emisiones (A2 y B2) y horizonte de tiempo 2050.

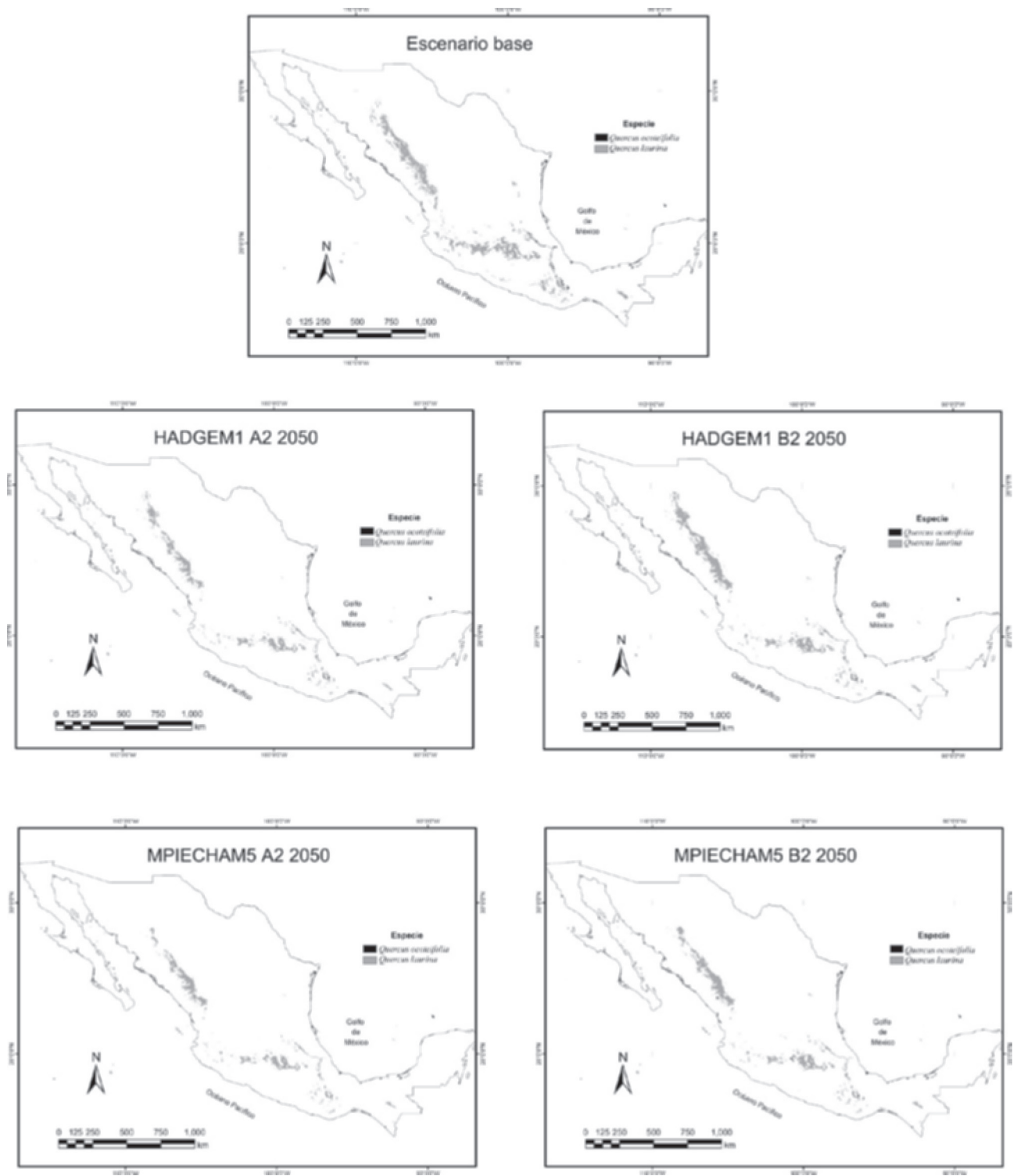


Figura 3. Mapas de distribución potencial de *Quercus ocoteifolia* (negro) y *Q. laurina* (gris) para el escenario base y 2 modelos de circulación general (MPIECHAM5 y HADGEM1), con 2 escenarios de emisiones (A2 y B2) y horizonte de tiempo 2050.

En el caso de *P. ayacahuite* y de acuerdo con lo registrado por Gómez-Díaz et al. (2011), se encontraron ciertas coincidencias en los requerimientos para la precipitación anual. El intervalo óptimo encontrado en este estudio va de 733-1 269 mm con una probabilidad de 0.59, que se encuentra dentro del intervalo de precipitación anual obtenido por Gómez-Díaz et al. (2011), que va de 800-1 600 mm, al que llamaron intervalo apto. En el caso de la temperatura media, el intervalo apto reportado por Gómez-Díaz et al. (2011) va de 10-14° C, mientras que en este estudio se reporta de 11.8-16.3° C., Gómez-Díaz et al. (2011) encontraron reducciones en las áreas de distribución para *P. ayacahuite* de hasta 80% y en este estudio los resultados muestran cambios de alrededor del 46%. A pesar que los autores referidos utilizaron las mismas capas ambientales que en este estudio, las diferencias obtenidas pueden deberse a la aplicación de un método distinto para obtener los requerimientos ambientales para las especies, que provienen de fuentes documentales y que algunos de esos trabajos están basados en información experimental o datos obtenidos en invernadero.

Las especies con intervalos de condiciones más restringidos fueron *A. hickelii* y *Q. ocoteifolia* que, además, se distribuyen en zonas con mayor precipitación anual (1 332-1 792 mm). Se prevé que en aquellas áreas en donde se registre una reducción en la cantidad de lluvia, las condiciones no serán adecuadas para el establecimiento y permanencia de estas especies. Es importante mencionar que presentan una superficie potencial de distribución mucho menor que las otras especies analizadas en este estudio. Estas especies son más sensibles al cambio climático, como se observa claramente en los resultados donde *A. hickelii* y *Q. ocoteifolia* presentan reducciones de entre 79 y 69%, respectivamente en sus áreas de distribución potencial.

En el caso de *P. ayacahuite* y *Q. laurina*, a pesar de presentar intervalos de condiciones ambientales amplios, también se observan reducciones en sus áreas de distribución potencial hasta en un 48%, pero el efecto es menor que en las especies que con intervalos de condiciones ambientales restringidos. Estas 2 especies son las que presentan mayor superficie de distribución potencial en México y muestran un efecto menor ante el cambio climático.

Existen diversas fuentes de incertidumbre cuando se utilizan las proyecciones de cambio climático y su aplicación en los modelos de distribución de las especies. En este estudio se utilizaron los modelos de circulación general y los escenarios de emisiones propuestos para la elaboración de la Cuarta Comunicación Nacional. Estos modelos fueron evaluados por un grupo de expertos, que consideraron que son los que mejor reproducen la climatología de México (Conde et al, 2011) y están

disponibles para el país (Fernández-Eguiarte et al., 2010). Si bien, la incertidumbre persiste y el cumplimiento de las proyecciones depende de la concentración de gases de invernadero en la atmósfera en los años venideros, estos ejercicios funcionan como una evaluación de lo que podría suceder si las tendencias continúan como hasta ahora.

De los modelos y escenarios aplicados en este trabajo, el MPIECHAM5 con emisiones altas (A2), resulta ser el más pesimista y esto se refleja en una disminución más notoria en las áreas de distribución de las especies analizadas. Mayor concentración en el CO₂ en la atmósfera supone un mayor aumento en la temperatura, por lo que el efecto en las especies que se distribuyen en las partes altas de las montañas será mayor. La proyección generada por el modelo HADGEM1 con escenario de emisiones B2, resultó ser un poco más conservadora y se refleja en un menor efecto sobre las especies analizadas.

Se ha sugerido que a causa de los cambios actuales en el clima, las especies podrían desplazarse verticalmente, por lo que podría cambiar la amplitud altitudinal de su distribución (Beniston, 1994; Dawson y Spannagle, 2009). Debido a esto, sus áreas de distribución se verán disminuidas y se promovería una pérdida poblacional severa, fundamentalmente en las especies que se establecen en las partes altas de las montañas, como es el caso de *P. hartwegii*.

Tomando en cuenta que muchas especies estarán expuestas a condiciones climáticas que no han experimentado en el último millón de años, se espera que las especies longevas sean más vulnerables a los cambios en el clima, como es el caso de las especies seleccionadas en este estudio. Las evaluaciones del efecto del cambio climático son multifacéticas y deben considerar todos los aspectos de la vulnerabilidad tales como la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Glick et al., 2011). En el futuro será importante incorporar otras variables como la dispersión de las semillas, dinámica poblacional y aspectos ecofisiológicos para conocer la respuesta de las especies. La capacidad de respuesta depende tanto de factores intrínsecos como la biología y la diversidad genética de las especies, como de factores extrínsecos como la velocidad, magnitud y naturaleza del cambio climático (Dawson et al., 2011). Las respuestas de ecosistemas y especies al cambio climático pueden ser estimadas a partir de modelos de distribución de especies, modelos dinámicos globales de vegetación y modelos Gap, entre otros (Hannah, 2011).

Es importante reconocer que la pérdida de biodiversidad no sólo se debe al cambio climático, sino también a otros factores asociados, los cuales tienen efectos en corto plazo como la fragmentación del hábitat, el cambio de uso de suelo, especies invasoras, etc. (Gavilán, 2008), por lo que la

pérdida de especies probablemente será mucho mayor que la proyectada en este trabajo. En este estudio se utilizaron las bases de datos de colectas de especies, ya que es la fuente de información disponible para conocer la ubicación de las mismas. Se reconocen las limitaciones que este tipo de información contiene, por ejemplo, el sesgo en los sitios de colecta que se relacionan con la distribución de caminos; errores en la ubicación geográfica exacta; errores en la identificación taxonómica de las especies; omisiones en la información de las etiquetas de los ejemplares; problemas en la captura de la información; falta de registros, entre otros problemas. Para tratar de reducir el efecto en el estudio, se hizo una revisión exhaustiva de las bases, para eliminar en la medida de lo posible datos considerados erróneos y que pueden ser detectados bajo ciertos criterios. Esta es una de las razones por la cual se excluyeron algunos de los datos extremos, que claramente eran indicativos de errores en la captura de la información de las colectas. El uso de estas bases claramente muestra que para muchas especies, la información disponible es aún insuficiente y que es necesario hacer esfuerzos para conocer de manera certera la distribución espacial.

El análisis realizado en este trabajo sirve como una aproximación para reconocer la severidad de los cambios en el clima sobre algunas especies. Para determinar la sensibilidad de una especie ante un factor asociado al cambio climático es fundamental delimitar sus umbrales de tolerancia; por esta razón se obtuvieron los intervalos óptimos para algunas variables climáticas para elaborar mapas de distribución potencial de las especies. Las especies con menores superficies de distribución potencial y con intervalos de condiciones ambientales restringidos, son las especies más sensibles en las proyecciones simuladas, ya que se localizan en sitios con condiciones muy específicas.

Literatura citada

- Beniston, M. 1994. Mountain environments in changing climates. Routledge, New York. 461 p.
- Burroughs, W. J. 2001. Climate change a multidisciplinary approach. Cambridge University Press, London. 248 p.
- Ciesla, W. 1995. Cambio climático, bosques y ordenamiento forestal, una visión de conjunto. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 146 p.
- Conde, C., F. Estrada, B. Martínez, O. Sánchez y C. Gay. 2011. Regional climate change scenarios for Mexico. *Atmósfera* 24:125-140.
- Dawson, B. y M. Spannagle. 2009. The complete guide to climate change. Routledge, New York. 436 p.
- Dawson, T., S. T. Jackson, J. House, I. Colin y G. M. Mace. 2011. Beyond predictions: Biodiversity conservation in a changing climate. *Science* 332:53-58.
- Dixon, R., J. Perry, E. Vanderklein y F. Hiol. 1996. Vulnerability of forest resources to global climate change: case study of Cameroon and Ghana. *Climate Research* 6:127-133.
- Fernández-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo y R. Romero-Centeno. 2010. Atlas climático digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.atmosfera.unam.mx/uniatmos/atlas/uniatmos.html>; última consulta: 03.III.2010.
- Gavilán, R. G. 2008. La vegetación de alta montaña. *In* Avances en biogeografía, M. Redondo, M. Palacios, F. López, T. Santamaría y D. Sánchez (eds.). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e Historia, Madrid. p. 165-174.
- Glick, P., B. A. Stein y N. A. Edelson (eds.). 2011. Scanning the conservation horizon: A guide to climate change vulnerability assessment. National Wildlife Federation, Washington, D. C. 168 p. <http://www.nwf.org/vulnerabilityguide>; última consulta: 06.V.2010.
- Gómez-Díaz, J. D., A. I. Monterroso-Rivas, J. A. Tinoco-Rueda, M. L. Toledo-Medrano, C. Conde-Álvarez y C. Gay-García. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. *Atmosfera* 24:31-52.
- Gray, P. 2005. Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples. *The Forestry Chronicle* 81:655-661.
- Hannah, L. 2011. Climatic change, connectivity and conservation success. *Conservation Biology* 25:1139-1142.
- Hardy, J. 2003. Climate change causes, effects and solutions. Wiley, New York. 247 p.
- Hughes, L. 2000. Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution* 15:56-61.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Cambio Climático 2001: la base científica. Contribución del grupo de trabajo I al tercer informe de evaluación del IPCC, J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, J. van del Linden y D. Xiaosu (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, New York. 93 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. H. Gitay, A. Suárez, R. Watson y D. Dokken (eds.). Ginebra. 85 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, R. Pachauri y A. Reisinger (eds.). Ginebra. 104 p.
- Loarie, S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field y D. D. Ackerly. 2009. The velocity of climate change. *Nature* 462:1052-1055.
- Mckenney, D. W., J. H. Pedlar, K. Lawrence, K. Campbell y M. F. Hutchinson. 2007. Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience*

- 57:939-948.
- Nogués-Bravo, D., M. B. Araujo, M. P. Errea, M. P. y J. P. Martínez-Rica. 2007. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17:420-428.
- Parnesan, C. 2006. Ecological and evolutionary response to recent climatic change. *Annual Review of Ecology and Systematics* 37:637-669.
- Peters, R. L. 1990. Effects of global warming of forest. *Forest Ecology and Management* 35:13-33.
- Peterson, A. T., H. Tian, E. Martínez-Meyer, J. Soberón y V. Sánchez-Cordero. 2005. Modeling ecosystems shifts and individual species distribution shifts. *In* *Climate change and biodiversity*, T. Lovejoy y L. Hannah (eds.). Yale University Press, Connecticut. p. 211-228.
- Root, T., D. MacMynowski, M. Mastrandrea y S. Schneider. 2005. Human-modified temperatures induce species changes: Joint attribution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102:7465-7469.
- Semarnat (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio - Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*. 30 de diciembre de 2010, Segunda Sección. México. http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/vidasilvestre/Documents/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf; última consulta: 06.V.2010.
- Smith, J. 1997. Setting priorities for adapting to climate change. *Global Environmental Change* 7:251-264.
- Thomas, C., A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145-149.
- Thuiller, W., S. Lavergne, C. Roquet, I. Boulangeat y M. B. Araújo. 2011. Consequences of climate change on the Tree of Life in Europe. *Nature* 448: 550-552.
- Villers, L. e I. Trejo. 2000. El cambio climático y la vegetación. *In* *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*, C. Gay (ed.). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. p. 57-72.
- Walther, G., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. Beebee, J. Fromentin y F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416:389-395.
- Walther, G., S. Beibner y A. Burga. 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16:541-548.
- Zar, J. 1999. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, New Jersey. 663 p.