



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

ACCIONES DE ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD
EN EL SECTOR FORESTAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO
EN EL ESTADO DE MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA
P R E S E N T A:
CARLOS MENDOZA LÓPEZ

Director de tesis: Dr. Ramiro Pérez Miranda



México D.F.

Abril de 2010



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.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser parte de mi formación y ayudar a desarrollarme como profesionalista.

Al CONACyT por apoyar el proyecto “Definición de acciones sobre el riesgo en materia de adaptación y vulnerabilidad para el sector primario ante el cambio climático en el estado de México”.

A los FONDOS MIXTOS COMECYT-GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO por la beca tesis.

Al Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por facilitarme el uso de sus instalaciones y permitirme ser parte de este proyecto.

Al Dr. Ramiro Pérez Miranda por su generosa ayuda y paciencia en las etapas de esta investigación.

Al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez por su gran apoyo y orientación a lo largo del proceso concerniente a esta investigación, así como por su invaluable amistad.

A la Mtra. María de la Paz Medina Barrios, a la Mtra. Irma Edith Ugalde García y a la Dra. Leticia Gómez Mendoza por sus valiosas aportaciones en la revisión de esta tesis, así como en su desarrollo.

A los investigadores del CENID-COMEF: Mtro. Antonio González Hernández y Mtro. Francisco Moreno Sánchez por su valiosa asesoría.

A mis amigos geógrafos: Francisco, Ernesto, Manuel y Edgar, quienes me acompañaron y motivaron a lo largo de la carrera.

Dedicatoria

A mis padres.

A mi familia.



RECONOCIMIENTO:

ESTA TESIS SE REALIZÓ CON EL APOYO DEL FONDO MIXTO CONACYT - ESTADO DE MÉXICO, COMO PARTE DEL PROYECTO “DEFINICIÓN DE ACCIONES SOBRE EL RIESGO EN MATERIA DE ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD PARA EL SECTOR PRIMARIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MÉXICO”

Índice general

Introducción	8
Capítulo 1. Fundamentos generales sobre cambio climático	12
1.1. El clima.....	12
1.2. El cambio climático.....	13
1.3. Causas del cambio climático	14
1.3.1. Causas naturales	14
1.3.2. Causas antropogénicas	15
1.4. Impactos del cambio climático.....	16
1.4.1. Sobre el medio ambiente y los recursos naturales.....	16
1.4.2. Sobre los servicios ambientales y la sociedad	18
1.5. Modelos de Circulación General de la Atmósfera y escenarios de cambio climático	20
1.5.1. Modelos de Circulación General de la Atmósfera.....	20
1.5.2. Tipos de modelos de cambio climático.....	22
1.6. Antecedentes.....	23
Capítulo 2. Aspectos referentes al sector forestal	26
2.1. Servicios ambientales y beneficios económicos que proporcionan los bosques... 26	
2.2. El bosque de coníferas y encinos en el estado de México y su importancia económica y social	28
2.2.1. Los bosques de coníferas y encinos	28
2.2.2. Aprovechamiento forestal maderable.....	31
2.3. Vulnerabilidad forestal ante el cambio climático	33
2.3.1 Estudios de vulnerabilidad forestal y escenarios posibles ante el cambio climático a nivel nacional.....	35
2.4. Acciones de adaptación y mitigación ante el cambio climático	38
2.4.1. Estrategias de adaptación y mitigación en el sector forestal	40
Capítulo 3. Estimación de la distribución de especies forestales bajo escenarios de cambio climático.....	47
3.1. Objetivos	47
3.2. Justificación del estudio.....	48
3.3. Características del medio físico del estado de México.....	49
3.3.1. Localización	49

3.3.2. Fisiografía y orografía	50
3.3.3. Suelos.....	51
3.3.4. Hidrología	52
3.3.5. Climas.....	53
3.3.6. Vegetación.....	55
3.4. Descripción del método	56
3.4.1. Selección de especies forestales evaluadas	56
3.4.2. Definición de variables para la evaluación de especies forestales	58
3.4.3. Cartografía digital de las variables empleadas	58
3.4.4. Áreas de restricción y supuestos	60
3.4.5. Evaluación de la aptitud actual del terreno.....	61
3.4.6. Evaluación de la aptitud potencial del terreno con escenarios de cambio climático.....	63
3.4.7. Aplicación de los escenarios de cambio climático.....	63
3.4.8. Evaluación de la aptitud potencial del terreno con escenarios de cambio climático proyectados para los años 2030 y 2050	65
3.5. Resultados y discusión.....	66
3.5.1. <i>Pinus patula</i>	66
3.5.2. <i>Abies religiosa</i>	73
3.5.3. <i>Quercus rugosa</i>	81
3.6. Acciones de adaptación y mitigación recomendadas.....	92
3.7. Conclusiones.....	94
Recomendaciones para mejorar estudios posteriores sobre el tema	96
Fuentes de información	98
Anexo. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para las tres especies seleccionadas	106

Índice de Tablas

Tabla

1	Modelos de Circulación General de la Atmósfera que mejor reproducen el clima observado en el mundo	21
2	Volumen y valor de la producción forestal nacional maderable, por género, para los años 1996, 1998, 2000, 2005 y 2008	31
3	Volumen y valor de la producción forestal maderable por género, 1996, 1998, 2000, 2005 y 2008 en el estado de México.....	32
4	Suelos presentes en el estado de México	51
5	Especies forestales consideradas y sus requerimientos agroecológicos	57
6	Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para <i>Pinus Patula</i>	67
7	Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para <i>Abies religiosa</i>	75
8	Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para <i>Quercus rugosa</i>	83
9	Medidas de adaptación y mitigación para <i>Pinus patula</i> , <i>Abies religiosa</i> y <i>Quercus rugosa</i>	93

Índice de Gráficas

Gráfica

1	Precipitación con escenarios de cambio climático con respecto a la actual.....	63
2	Temperatura con escenarios de cambio climático con respecto a la actual.....	64
3	Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para <i>Pinus patula</i> , con respecto a la total del estado	70
4	Aptitud con escenarios de cambio climático por superficie para <i>Pinus patula</i>	71
5	Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para <i>Abies religiosa</i> con respecto a la total del estado	78
6	Aptitud actual y con escenarios por superficie para <i>Abies religiosa</i>	79
7	Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para <i>Quercus rugosa</i> con respecto a la total del estado	86
8	Aptitud con escenarios de cambio climático por superficie para <i>Quercus rugosa</i>	87

Índice de Figuras

Figura

1a	<i>Pinus patula</i>	29
1b	Bosque de <i>Pinus patula</i>	29
1c	<i>Abies religiosa</i>	29
1d	<i>Quercus rugosa</i>	30
1e	Bosque de encino	30
2	Ubicación del estado de México en la República Mexicana	48
3	Rangos de altitud en el estado de México	49
4	Provincias fisiográficas en el estado de México	50
5	Suelos predominantes en el estado de México	52
6	Climas del estado de México	53
7	Tipos de vegetación en el estado de México	55
8	Zonas de restricción consideradas para la evaluación de aptitud	60
9	Álgebra de mapas para <i>Pinus patula</i>	61
10	Aptitud actual del terreno para <i>Pinus patula</i>	66
11	Distribución de <i>Pinus patula</i> con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2030	69
12	Distribución de <i>Pinus patula</i> con el escenario A2 del modelo HADGEM para el año 2050	69
13	Aptitud actual del terreno para <i>Abies religiosa</i>	73
14	Sitios de colectas y aptitud actual del terreno para <i>Abies religiosa</i>	74
15	Distribución de <i>Abies religiosa</i> con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2050	77
16	Distribución de <i>Abies religiosa</i> con el escenario B2 del modelo HADGEM para el año 2030	77
17	Aptitud actual del terreno para <i>Quercus rugosa</i>	81
18	Sitios de colectas y aptitud actual del terreno para <i>Quercus rugosa</i>	82
19	Distribución de <i>Quercus rugosa</i> con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2050	85
20	Distribución de <i>Quercus rugosa</i> con el escenario B2 del modelo HADGEM para el año 2030	85

Introducción

El estudio del cambio climático se ha dado a partir de 1990 aproximadamente en nuestro país y se encuentra actualmente en rápida expansión. Los esfuerzos en investigación, se dirigen hacia el entendimiento de los mecanismos del cambio climático y, a la simulación de escenarios del clima en el futuro. Se están logrando avances rápidos y sustanciales en la compilación de datos y modelaje, así como en nuestro conocimiento del sistema climático y las incertidumbres en la predicción (Goodess, 1992).

Los impactos potenciales del cambio climático en una escala de décadas o siglos son relevantes para las actividades forestales y económicas futuras. La información acerca de los escenarios futuros en el clima es esencial para el desarrollo de políticas energéticas. Se está probando que las decisiones sobre el uso de niveles apropiados de combustibles fósiles, van a ser guiadas por el conocimiento de sus impactos potenciales sobre el clima. Las apreciaciones sobre el impacto ambiental son una característica cada vez más común en los procesos de planeación (Confalonieri *et al.*, 2009).

Las variaciones climáticas alteran los componentes del ciclo hidrológico y los parámetros climáticos. Los umbrales de temperatura y precipitación son elementos climáticos determinantes para el establecimiento de una especie y/o una comunidad vegetal en determinado sitio. La mayoría de los procesos fisiológicos que se realizan para el crecimiento y desarrollo de las plantas requieren de suficiente agua y son fuertemente influenciados por la temperatura y la radiación solar. (Gómez *et al.*, 2007).

De acuerdo con Landa *et al.* (2008), existen países en donde se da una relación estrecha entre la disponibilidad de agua potable y los recursos naturales que representan las zonas forestales. Esto se da principalmente en las naciones con bosques tropicales o templados que carecen de cordilleras con nieve y glaciares

permanentes o casi permanentes. México se halla en estas circunstancias debido a su relieve, por lo que los bosques se vuelven uno de los requisitos para conservar sus fuentes de agua dulce.

Sin los bosques bien conservados y administrados, la presencia de las corrientes subterráneas de agua, los manantiales, los arroyos y ríos disminuirá drásticamente en los próximos lustros; así como también serán afectados los servicios ambientales que proporcionan, como: la conservación de la biodiversidad, la protección del suelo, la captura de carbono y la calidad del agua. Asimismo, los impactos en la economía local se podrían traducir en menos empleos dependientes de los bosques, además del encarecimiento de bienes de consumo que usan como materia prima la madera (Markham, 1996).

Trejo (1999) dice que la distribución geográfica de los bosques, su composición, sus características y su productividad están determinadas en forma natural por las condiciones del clima global y local. Tradicionalmente se ha considerado a los elementos y factores del clima como el mayor determinante de la distribución de la vegetación. Las plantas adaptadas a un régimen climático particular, con frecuencia tienen morfologías similares o ciertos tipos de formas de crecimiento.

Los alcances del presente trabajo, abarcan el problema de la vulnerabilidad y adaptabilidad de especies forestales frente al cambio climático en escenarios futuros para el estado de México. La vulnerabilidad se estudió en términos de los cambios que pueden ocurrir en la distribución de las especies seleccionadas, a partir de los escenarios del clima que se consultaron.

La investigación tuvo como propósito, determinar la aptitud actual del terreno y bajo escenarios de cambio climático para tres especies forestales: *Pinus patula*, *Abies religiosa* y *Quercus rugosa*; estas especies fueron seleccionadas debido a que sus características ecológicas y económicas son de gran relevancia para la zona de estudio y, por ser representativas de tres pisos altitudinales dentro de las

regiones de clima templado. Para la determinación de la aptitud se emplearon criterios edáficos, topográficos y climáticos. Para obtener la aptitud potencial con escenarios de cambio climático se utilizaron, junto con las variables seleccionadas de entre los criterios mencionados, las variables temperatura media anual y precipitación total anual, generadas por los modelos de Circulación General de la Atmósfera GFDL 2.0 y HADGEM, con los escenarios A2 y B2 para los años 2030 y 2050.

Se analizaron los cambios en la distribución de las superficies aptas, bajo las nuevas condiciones de temperatura y precipitación, de acuerdo con los escenarios de cambio climático y, se propusieron acciones de adaptación y mitigación para reducir la vulnerabilidad de las especies forestales.

Este trabajo contiene tres capítulos. En el primero se expone lo referente al clima y al cambio climático, así como su importancia e impactos sobre la ecología y las actividades humanas. Posteriormente, se explica en qué consisten los modelos climáticos y cómo, a partir de ellos, se puede obtener información valiosa para los estudios de impacto ambiental.

El segundo capítulo se concentra en la importancia ecológica y económica. Se habla sobre la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales frente a los cambios en el clima; se realza la trascendencia de estudios sobre esta vulnerabilidad a nivel nacional y regional, lo que permite determinar estrategias de adaptación y mitigación, las cuales también son tratadas en este capítulo.

En el capítulo tres se plantean los objetivos de la investigación, se describen los rasgos del medio físico de la entidad, la metodología y resultados y discusión. La metodología describe la selección de especies forestales y define las variables agroecológicas, la cartografía digital empleada y los procesos de evaluación actual y bajo escenarios de cambio climático. En la parte de los resultados y discusión fueron analizadas las especies forestales evaluadas, y se propusieron acciones de

adaptación y mitigación para enfrentar el cambio climático. Finalmente se presentaron las conclusiones.

Capítulo 1. Fundamentos generales sobre cambio climático

1.1. El clima

La palabra clima proviene de un vocablo griego que significa *inclinare*; ya desde la antigüedad se sabe que la inclinación con que inciden los rayos solares sobre la superficie terrestre es un factor importante en la determinación del clima (Ayllón, 2003).

Clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio atmosférico de un lugar. En realidad, puede decirse que el clima de un lugar es una situación atmosférica imaginaria en que existirían los valores medios de la temperatura, viento, humedad, etc., registrados durante un largo periodo. Es el resultado de observaciones periódicas recopiladas durante varios años, mismas que son sometidas a un análisis estadístico (Ayllón, 2003). Para la Organización Meteorológica Mundial, es la síntesis de las condiciones del tiempo en una determinada área, definida por estadísticas a largo plazo de las variables del estado atmosférico (Ciesla, 1996).

Existe una diferencia fundamental entre el clima y el tiempo atmosférico. En el nivel más simple, el tiempo atmosférico es lo que tenemos, el clima es lo que esperamos. Así, el tiempo es lo que está ocurriendo en la atmósfera en cualquier momento: el clima es lo que las estadísticas nos dicen que debe ocurrir en cualquier momento del año. Aunque las estadísticas se concentran en promedios, contruidos sobre muchos años, también dan una imagen exacta de la incidencia de eventos meteorológicos extremos, los cuales son normales para cualquier parte del mundo. Los cambios en la frecuencia de estos eventos extremos ejercen una influencia mayor en la interpretación de cambios climáticos (Burroughs, 2007).

En las nuevas teorías sistémicas, el clima es concebido como un sistema que se mantiene en el espacio y el tiempo gracias al intercambio de energía que se produce a nivel de la superficie terrestre mediante la circulación general del aire. El funcionamiento de este sistema se circunscribe a las relaciones entre la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera (Ayllon, 2003).

Las propiedades que caracterizan al clima incluyen las térmicas (temperaturas en la superficie del aire, del agua, de la tierra, del hielo), las cinéticas (las corrientes oceánicas y de viento, junto con los movimientos verticales asociados y de las masas de aire, humedad acuosa, nubosidad y contenido de agua en las nubes, agua del suelo y en lagos) y las estáticas (presión y densidad de la atmósfera y el océano, composición del aire seco, salinidad de los océanos y las constantes físicas del sistema). Estas propiedades se interrelacionan por varios procesos físicos como la precipitación, la evaporación, la radiación infrarroja, la convección, la advección y la turbulencia (Goodess y Davies, 1992).

1.2. El cambio climático

El cambio climático se refiere a las alteraciones en el clima atribuidas directa o indirectamente a la actividad humana, que afectan la composición de la atmósfera mundial y que se suman a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992). El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) indica que el cambio climático es una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado de tiempo, normalmente decenios o incluso más tiempo (IPCC, 1998).

El cambio climático global es una consecuencia del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), resultado, principalmente, de la quema de

combustibles fósiles, lo que ha provocado un cambio en las condiciones atmosféricas globales (Arriaga y Gómez, 2004).

1.3. Causas del cambio climático

Las investigaciones científicas han llegado a la conclusión de que las actividades humanas alteran de manera directa o indirecta la composición de la atmósfera que, agregadas a la variabilidad climática natural, han provocado que el clima, a nivel global, se vea alterado significativamente en este siglo (Santiago, 2008).

1.3.1. Causas naturales

Los cambios en el clima de la Tierra han tenido lugar durante toda su existencia. Como uno de los testimonios de estos cambios tenemos a las glaciaciones por las que ha atravesado el planeta, en cuyos periodos interglaciares, se elevó el nivel del mar hasta 3 m y la temperatura por arriba de los 2 o 3°C de la media actual (Ayllon, 2003). Según Hopkin (2005), los fenómenos naturales más importantes que han tenido relación con los cambios en el clima son los siguientes:

- El incremento de las manchas solares en ciclos de once años de duración, el cual se relaciona con periodos de temperaturas cálidas y su ausencia, con largas épocas gélidas.
- Los cambios en la posición de la Tierra y movimientos periódicos con respecto al Sol como la nutación y la precesión, cuya combinación hace variar sensiblemente la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra y su distribución superficial.
- La influencia de la Luna como regulador climático de la Tierra. La inclinación del eje respecto a la eclíptica, es muy estable, con variaciones de 2.3°, lo que se debe a la influencia gravitatoria que ejerce la Luna sobre el planeta.
- La actividad volcánica, la cual produce polvo y cenizas, que al quedar suspendidos en el aire, actúan como un escudo que bloquea parte de la radiación solar y causan un posible enfriamiento en la superficie terrestre.

- El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), que consiste en un cambio en los patrones de movimientos de las masas de aire, provocando, en consecuencia, un retardo en la cinética de las corrientes marinas normales. Desencadena el calentamiento de las aguas sudamericanas y provoca estragos a escala mundial. El Niño es uno de los fenómenos de mayor importancia como modulador de las lluvias en México. Al fenómeno que produce condiciones inversas se le conoce con el nombre de La Niña (Magaña, 2004).

1.3.2. Causas antropogénicas

El incremento de bióxido de carbono y otros gases, como metano, ozono a nivel del suelo, clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno en la atmósfera, está provocando un calentamiento de sus capas bajas. Estos gases crean un *efecto invernadero* porque permiten el paso de las radiaciones solares de onda corta (luz visible); en cambio, absorben y reemiten a la Tierra la radiación de onda larga (radiación infrarroja), lo que provoca el calentamiento de la superficie terrestre. Las principales fuentes de emisión de CO₂ son la actividad industrial y los automotores porque consumen gran cantidad de combustibles fósiles (Carpenter, 1991). Cada año, 5,000 millones de toneladas de CO₂ son expulsadas a la atmósfera por todas las industrias y; por otra parte, los incendios forestales aportan 1,000 millones de toneladas adicionales (Ayllon, 2003).

El aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero es el que causa cambios regionales y mundiales en la temperatura, precipitación y otras variables climáticas, lo cual provoca cambios en la humedad del suelo, derretimiento de glaciares, incrementos en el nivel del mar, y la ocurrencia más frecuente y severa de eventos extremos como: huracanes, frentes fríos, inundaciones y sequías (Santiago *et al.*, 2008).

México se encuentra entre los 70 países con mayores emisiones de GEI per cápita, ya que emite 0.96 toneladas anuales de carbono per cápita a la atmósfera; es el primero en Latinoamérica. Esa cantidad de emisiones, sin embargo, se

encuentra muy por debajo de lo que producen los países desarrollados. Estados Unidos, por ejemplo, emite 5.6 toneladas anuales. En el caso de México, 30.5% de las emisiones de GEI están fuertemente relacionadas con las actividades de cambio de uso del suelo, asociadas a su vez con procesos de deforestación (Arriaga y Gómez, 2004).

Otras actividades que afectan al clima son la deforestación y la sobreexplotación de pastos, las cuales producen una creciente desertificación. Un suelo desnudo refleja mayor cantidad de energía que cuando está cubierto de vegetación. Esto provoca que durante la noche se dé la presencia de aire frío sobre la superficie terrestre y aire caliente en las capas superiores; esta inversión inhibe la convektividad (circulación del aire de abajo hacia arriba y viceversa) y con ello la formación de nubes y de lluvia, además de que enajona los contaminantes con graves consecuencias para la salud de la población (Cosgrove, 1992).

La creciente urbanización también influye en el cambio del clima. Cuando se rempazan tierras de labor, bosques, pastizales y, en general, áreas de vegetación por fábricas, casas, carreteras y crece la mancha urbana, se altera la temperatura, la humedad, la circulación y la composición del aire de esas zonas en forma progresiva. Durante la noche, el calor que retienen edificios y pavimentos, determina que la temperatura sea mayor entre 1.5 y 2. 0° C a la de otras zonas con más vegetación que la rodean; se crean *islas de calor* (Ayllon 2003).

1.4. Impactos del cambio climático

1.4.1. Sobre el medio ambiente y los recursos naturales

Como consecuencia del incremento de los niveles de concentración atmosférica de CO₂ y otros GEI, se espera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8° C de 1990 al 2100. Dicho incremento en la temperatura no sólo es entre dos y diez veces superior al observado en los últimos cien años

(0.6° C), sino que, además, no tiene precedente en los mil años anteriores y se pronostica que ocurrirá a un ritmo significativamente más rápido que los cambios observados en los últimos diez mil años (Estrada, 2001).

El cambio climático tendrá efectos tanto adversos como benéficos en los sistemas ambientales y socioeconómicos; sin embargo, cuanto mayores sean los cambios y la velocidad a la que se den, más predominarán los impactos adversos; éstos afectarán en mayor medida a los países en desarrollo debido a que se encuentran en condiciones vulnerables, al no tener acceso a recursos financieros y tecnológicos, mismos que evitarían que la población se encontrara en riesgo. Además, estos países no cuentan con los recursos y fondos para desastres suficientes para mitigar las pérdidas (Avalos, 2007).

Algunos de los daños a ecosistemas y especies vulnerables serán irreversibles. Se han identificado muchos sistemas físicos susceptibles de sufrir por el cambio climático (glaciares y nivel del mar, entre otros). En algunas latitudes medias y altas, la productividad de las plantas aumentaría con un pequeño incremento de la temperatura; no obstante, pasando cierto umbral de temperatura, su productividad descendería en la mayor parte del mundo (Avalos, 2007).

Estudios recientes sobre cambio climático regional y global, señalan que los incrementos de temperatura pueden afectar tanto a los sistemas físicos como a los sistemas biológicos del planeta en distintos niveles (IPCC, 1998). La alteración de la temperatura de la atmósfera genera cambios en la dinámica de la misma, y por lo tanto, modifica los patrones de precipitación en el planeta. Este fenómeno tiene repercusiones particularmente graves para los ecosistemas naturales, ya que provoca la pérdida y degradación de la riqueza biótica del planeta, la erosión de suelos, cambios en los patrones de evapotranspiración y contaminación de los mantos acuíferos, entre otros (Villers y Trejo, 2007).

Los posibles efectos que estos cambios en el clima puedan tener en los ecosistemas, se han podido percibir debido a la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, que aunque normalmente se presentan en la naturaleza, en los últimos años se han registrado cambios en la frecuencia, intensidad y persistencia de sistemas como son las ondas de calor, precipitaciones intensas, sequías, fuertes huracanes, así como en la intensificación de los efectos del fenómeno El Niño (Villers y Trejo, 2007). De acuerdo con las investigaciones, estos cambios podrían estar asociados al incremento en la atmósfera de los GEI. Los estudios indican que es posible que la elevación de la temperatura propicie un incremento en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales (Walsh y Pittock, 1998), lo cual va asociado con lluvias extremas, fuertes vientos y posibles inundaciones en periodos muy cortos (Villers y Trejo, 2007).

El IPCC en el 2002 señaló que con base en modelos predictivos, aproximadamente el 33% de la superficie forestal actual en el mundo se verá afectada a causa de cambios en la frecuencia e intensidad de los fuegos y la distribución del agua (Dale, 2001). Así también, ocurrirán cambios en la biodiversidad debido al clima no favorable. Se originarán disturbios ecológicos relacionados con el incremento o la disminución de la capacidad de los suelos para liberar o retener nutrientes; ya se está dando una floración fuera de época adecuada para la polinización, así como la caída del follaje fuera de fase climática y la ruptura de las relaciones simbióticas (Mansilla, 2007).

1.4.2. Sobre los servicios ambientales y la sociedad

Los aumentos en evapotranspiración, resultado del calentamiento del planeta, reducirán la disponibilidad de agua, la cual está en relación directa con las condiciones climáticas, en especial con el mayor o menor volumen de precipitación. Con una población más numerosa y con ciudades más grandes, la demanda de agua se incrementará substancialmente en el futuro cercano. Si ocurre un cambio climático global, aquellos estados que actualmente tienen clima

árido y semiárido es probable que experimenten procesos de desertificación. Esta condición aumentaría enormemente la vulnerabilidad de las poblaciones a la falta de agua (Aguilar, 2000).

Por un lado, el aumento de las temperaturas y de la intensidad en la precipitación, así como los cambios en el ciclo hidrológico en general, promueven muchas formas de contaminación del agua, lo que impactará en los ecosistemas, la salud humana, la fiabilidad de los sistemas hídricos y los costos de operación. En contraparte, en condiciones de sequía severa, las prácticas agrícolas inadecuadas como el manejo deficiente del agua combinado con deforestación, la erosión del suelo y el uso excesivo de agroquímicos, reducirán la calidad y la cantidad del agua superficial y de los mantos freáticos (Moreno y Urbina, 2008).

El calor también puede provocar impactos sobre los costos de energía con respecto a la producción y los precios de los productos, la productividad laboral y las actividades recreativas, lo cual tendría repercusiones económicas para los países (Wilbanks *et al.*, 2007).

Para un número importante de habitantes de países en vías de desarrollo, las proyecciones relativas al cambio climático indican que habrá medios de sustento menos seguros, mayor vulnerabilidad al hambre y la pobreza, acentuación de las desigualdades sociales y una mayor degradación ambiental. Las pérdidas en la agricultura producirán efectos multiplicadores que se diseminarán a través de economías enteras y transmitirán la pobreza de las áreas rurales a las áreas urbanas (Moreno y Urbina, 2008).

En algunos casos los eventos hidrometeorológicos extremos como huracanes, sequías y degradación ambiental pueden propiciar migración a zonas urbanas, con la subsecuente presión social al exceder la capacidad del lugar para cubrir las necesidades de los inmigrantes, lo que se traduce en una más grave presión

social con desempleo, mayor marginación, hacinamiento y diseminación de enfermedades infecciosas (Moreno y Urbina, 2008).

1.5. Modelos de Circulación General de la Atmósfera y escenarios de cambio climático

1.5.1. Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Los modelos climáticos son una representación matemática simplificada que pretende simular los múltiples procesos que originan el clima, mediante la descripción de este sistema en términos de leyes físicas básicas; por lo tanto, se puede considerar que un modelo está compuesto por una serie de ecuaciones que expresan dichas leyes (McGuffie y Henderson-Sellers, 2005). Los modelos computacionales utilizados para la predicción contienen un arreglo complejo de éstas ecuaciones, las cuales gobiernan el nacimiento, crecimiento, decadencia y movimiento de los sistemas atmosféricos (Burroughs, 2007).

En el panorama general, el recurso más avanzado para el estudio del clima es el conjunto de Modelos de Circulación General de Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCM, por sus siglas en inglés). Simulan una gran variedad de los procesos que ocurren, en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales entre los diversos sistemas climáticos (Gay *et al.*, 2008).

Los estudios de cambio climático utilizan distintos modelos de clima y un conjunto de escenarios de emisiones, para reflejar el rango de incertidumbre causado por las diferentes suposiciones que se tienen, en cuanto al cambio en las emisiones de GEI, el cambio tecnológico, población, tipo y grado de desarrollo económico, entre otros. De esta manera, cada escenario representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima en el futuro (Gay *et al.*, 2008).

Para elaborar los escenarios de cambio climático es necesario el uso de escenarios de emisiones de GEI. A partir de éstos, es posible calcular las

concentraciones globales y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de temperatura global. Consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos cien años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía (Gay *et al.*, 2008).

Los escenarios se dividen en A y B. Los A se dividen en A1 y A2; los B se dividen en B1 y B2. A continuación se describen los escenarios de acuerdo con el IPCC (2000).

- Escenario A1: un mundo futuro de muy rápido crecimiento económico, la población global llega a su punto máximo a mitad del siglo y disminuye a partir de entonces. Se da una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes.
- Escenario A2: un mundo muy heterogéneo con un aumento continuo en la población global y un crecimiento económico regional más lento, el cual está más fragmentado que otros escenarios.
- Escenario B1: un mundo convergente con la misma población global, como en el escenario A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas hacia una economía orientada a los servicios y la información, con reducciones en la intensidad material y, la introducción de tecnologías limpias y eficientes en la transformación de recursos.
- Escenario B2: un mundo en el cual se da un énfasis en soluciones locales a la sustentabilidad social, ambiental y económica, con un aumento continuo de la población (menor al de A2), y un desarrollo económico intermedio.

Los escenarios ayudan en el análisis del cambio climático, incluyendo el modelado del clima y la estimación de impactos, adaptación y mitigación. El concepto de escenario no debe confundirse con el de pronóstico, ya que el objeto de cada uno de ellos es diferente. Los escenarios climáticos se definen como una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de

relaciones climatológicas, han sido construidos expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico (IPCC, 2000).

Los escenarios de cambio climático deben brindar información relevante para los sectores o a la medida de las necesidades del usuario, suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto. La necesidad de contar con información detallada para diseñar políticas de adaptación ha resultado en que la mayoría de los escenarios de cambio climático han sido regionalizados (Gay *et al.*, 2008).

1.5.2. Tipos de modelos de cambio climático

Existen varios modelos de circulación general de la atmósfera. Gay *et al.* (2008) indica, que según criterios estadísticos hay algunos que reproducen mejor el clima observado en el mundo. En la **tabla 1** se presentan estos modelos y su resolución espacial en número de cuadros en la malla.

Tabla 1. Modelos de Circulación General de la Atmósfera que mejor reproducen el clima observado en el mundo

Modelo	País de origen	Resolución	Modelo	País de origen	Resolución
CCSM--30	E.U.A.	105	GISS-EH	E.U.A.	13
MIROC-HI	Japón	162	GISS-ER	E.U.A.	13
MPIECH-5	Alemania	61	IPSL_CM4	Francia	25
MRI-232A	Japón	31	NCARPCM1	E.U.A.	28
MODBAR	N/D	N/D	UKHADGEM	Reino Unido	92
UKHADCM3	Reino Unido	27	CCCMA-31	Canadá	27
ECHO---G	Alemania/Corea	19	BCCRBCM2	Noruega	29
GFDLCM21	E.U.A.	40	FGOALS1G	China	32
CNRM-CM3	Francia	28	GFDLCM20	E.U.A.	45
CSIRO-30	Australia	71	INMCM-30	Rusia	13
MIROCMED	Japón	26			

Elaborado con base en: Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación. Gay *et al.* (2008).

Los modelos que mejor reproducen el clima observado, que fueron elegidos para la Cuarta Convención Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio climático, son: el GFDL 2.0 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), el cual es un modelo estadounidense, el MPIECHAM5, creado en Alemania y, el HADGEM que se desarrolló en el Reino Unido. Tienen resoluciones espaciales de 10 x 10 km (Gay *et al.* 2008).

1.6. Antecedentes

En México, los estudios relacionados con el impacto y vulnerabilidad del cambio climático sobre los ecosistemas forestales con respecto al ámbito nacional, han aplicado algunos Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCGA), en los cuales se considera la emisión del doble de CO₂ en la atmósfera para simular las condiciones de temperatura y precipitación que imperarían en el futuro, con las nuevas condiciones de emisiones mencionadas. Los resultados obtenidos indican que los tipos de vegetación que se verán más afectados por el cambio climático global serán los bosques de coníferas y encinos, seguidos del matorral xerófilo y el bosque mesófilo de montaña (Villers y Trejo, 2007).

El sector forestal ha sido tema de análisis en cuatro comunicaciones nacionales anteriores que México ha enviado a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. Las temáticas generales relacionadas con este sector son: a) los impactos del cambio climático y b) medidas de mitigación respecto al cambio climático. Dentro de la primera temática se han utilizado MCGA para simular la distribución de los distintos tipos de vegetación, que al comparar con la cartografía de vegetación actual, se obtienen zonas potenciales de cambio de distribución de las comunidades vegetales (Gómez *et al.*, 2009).

El informe final de la Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, elaborado por Gómez

et al., 2009, contiene los resultados de la evaluación de aptitud con escenarios de cambio climático a nivel nacional de especies de zonas consideradas como templada, tropical y semiárida. En la zona tropical se observa que la precipitación excede a la evaporación, a diferencia de la zona semiárida, que corresponde a regiones donde la evaporación excede a la precipitación y frecuentemente las temperaturas son extremosas; en cuanto a la zona climática templada, las lluvias se presentan en un nivel intermedio entre las zonas tropical y semiseca, así como sus temperaturas a lo largo del año (Ayllón, 2003). Dentro de la zona templada, que es la que nos interesa en el presente estudio, el informe arrojó resultados de varias especies forestales, entre las que se encuentran *Pinus patula* y *Abies religiosa*.

Se emplearon los escenarios A2 y B2 de los modelos GFDL 2.0 y HADGEM con los cuales se evaluó la distribución potencial de las especies para el año 2050. En el caso de *Abies religiosa*, las superficies aptas del mapa de aptitud actual tienen una distribución, la cual cubre una gran parte del estado de México, sobre todo en el centro, en el este y norte; además de una zona menor en el este (Gómez *et al.*, 2009).

Gómez *et al.* (2009) concluye que *Abies religiosa* será una especie poco afectada, ya que disminuye su aptitud natural en un 2.5% y 5.8% con los modelos GFDL 2.0 y HADGEM respectivamente (escenario A2, año 2050) respecto a la superficie nacional en donde se encuentra la especie. Ese cambio se debe al incremento en la temperatura en todo el territorio nacional y la disminución de la precipitación de acuerdo con las proyecciones de los escenarios utilizados (Gómez *et al.*, 2009).

Por otra parte, Arriaga y Gómez (2004), en su trabajo de evaluación para otra especie de clima templado, en este caso *Quercus rugosa*, con el modelo HADCM2, obtuvieron una reducción en superficies aptas a nivel nacional de 25.7%. Se emplearon los mismos modelos y escenarios que en el estudio de Gómez *et al.* (2009).

Otros estudios como el de Gómez, et al. (2007), utilizaron los modelos GFDL-R30 y HadCM3 proyectados para los años 2020 y 2050 para evaluar la distribución de la especie cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, México; Los resultados arrojados para esta especie, adaptada a los climas húmedos, indican que las superficies aptas para el modelo GFDL-R30 aumentan en 3.1 y 4.4% para los años 2020 y 2050 respectivamente. Con el modelo HadCM3 la superficie apta disminuye 0.9% para el 2020 y 0.2% para el año 2050.

Capítulo 2. Aspectos referentes al sector forestal

2.1. Servicios ambientales y beneficios económicos que proporcionan los bosques

Existen pocos ecosistemas terrestres que se acerquen a los bosques y selvas en términos de la gran variedad y número de servicios ambientales que proporcionan (Daily, 1997). Los servicios ambientales (SA) son las condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los comprenden, benefician, apoyan y sustentan a la población humana para su bienestar y desarrollo; ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable, a nivel local, regional o global (Daily, 1997, Challenger, 2009, CONAFOR, 2009).

Para el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS, 1999) los SA se dividen en tres tipos: a) Servicios de Provisión: producción de alimentos, madera, productos medicinales e hidrológicos. b) Servicios de Regulación: captura de carbono, equilibrio del clima, control de la erosión de los suelos, de plagas y de desastres naturales (como los huracanes), conservación de la biodiversidad, provisión y limpieza del agua y banco genético. c) Servicios Culturales: paisaje estético y valor espiritual o religioso de algunas especies de plantas y animales, o espacios de recreación.

Otros autores como Apps *et al.*, (1993), Stadtmuller (1994), Maser (1996), Manson (2004) y Salusso (2008), hacen la siguiente mención sobre los SA que proporcionan los bosques:

- Conservación de la biodiversidad. La mayoría de los ecosistemas forestales albergan especies endémicas y no endémicas de flora y fauna.
- Protección del suelo. Debido a su estructura y su sistema de raíces profundas, entre otras características, los bosques naturales son

considerados la mejor protección para los suelos. Los árboles tienen un efecto favorable en la textura del suelo, la estabilidad estructural, el contenido de materia orgánica, y la permeabilidad del suelo. Por consiguiente, determinan su susceptibilidad a la erosión, sobre todo, en áreas con pendientes abruptas o mucha precipitación.

- Captura de carbono. Los ecosistemas se encargan de incorporar el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Los bosques del mundo (templados y tropicales) capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo. A pesar de ser actualmente fuentes netas de emisión de GEI, los bosques tienen la posibilidad de mitigar los GEI por medio de la captura de carbono en diferentes ecosistemas vegetales conocidos como sumideros de carbono.
- Conservación de regímenes de agua para las cuencas. Las cuencas cubiertas por bosques se caracterizan por la producción de agua de alta calidad, debido a la gran capacidad de los bosques para filtrar el agua.
- Minimización de ciclos de inundación y sequía y, la regulación del clima a escalas locales y regionales entre otros servicios ambientales.

En el aspecto económico, los bosques son proveedores de una amplia variedad de recursos y bienes. Las industrias obtienen de los bosques recursos para producir bienes maderables (laminados, durmientes, muebles, papel, cartón, etc.), bienes no maderables (productos farmacéuticos, alimentos) y leña como fuente de energía. Mientras que los consumidores pueden usar directamente los recursos forestales, como es el caso de las zonas rurales, en donde se aprovecha la leña, la tierra de monte, la hojarasca y la resina, entre otros productos, o bien, pueden adquirir productos maderables y no maderables producidos por la industria (Salusso, 2008).

Existen también los pagos por servicios ambientales (PSA) a personas o empresas, proporcionados por la conservación de los bosques, la reforestación y la explotación sustentable de los mismos, así como por ciertas prácticas de agrosilvicultura y pastoreo silvícola. Los PSA se hacen por mitigación de emisiones de GEI (fijación, reducción, secuestro, almacenamiento y absorción) (Mayrand y Paquin, 2004).

2.2. El bosque de coníferas y encinos en el estado de México y su importancia económica y social

2.2.1. Los bosques de coníferas y encinos

El territorio forestal del estado de México tiene una superficie de 894,000 ha, de las cuales 558,000 son de bosques (Probosque, 2010). El bosque de coníferas y encinos se caracteriza ecológicamente por habitar en las tierras templadas y semihúmedas, propias de las zonas montañosas de México. Su composición y estructura tienen una amplia gama de variantes que van desde las masas puras de coníferas hasta las de encinos, pasando por los bosques mixtos. Los encinares, son bosques que están constituidos principalmente por árboles del género *Quercus*, aunque pueden haber muchas otras especies, de entre las que destacan los pinos (Rzedowski y Equihua, 1987). Los encinos se encuentran desde el nivel del mar hasta los 3,100 msnm aunque más de 95% de su extensión se halla en altitudes entre 1,200 y 2,800 msnm.

Los bosques de coníferas están constituidos principalmente por diferentes especies de pinos y de oyameles, en masas puras o mezcladas entre ellas, o bien, con encinos y otros árboles de hoja ancha (latifoliadas); cuando conviven con éstos últimos, por ejemplo, forman ecotonos o zonas de transición. Se les encuentra prácticamente desde el nivel del mar hasta el límite de vegetación arbórea en las altas montañas, por arriba de los 4000 m de altitud (Rzedowski y Equihua, 1987).

Existen quince especies nativas de pino en el estado de México y cinco especies introducidas (SIRE, 2006). Las coníferas son de gran importancia económica, principalmente por su madera, la cual destaca por la dureza, resistencia y por la resina. El pino es muy importante en la construcción, es la especie más utilizada para hacer vigas, puertas, ventanas y muebles. En el estado de México, la mayoría de pinos viven en lugares montañosos, en clima templado y aún semitropical (Del Castillo *et al.*, 2004).

En México se considera que existen alrededor de ocho especies de *Abies*, seis de éstas son endémicas. Se desarrollan en altitudes que oscilan entre los 1,700 y 3,500 metros sobre el nivel del mar. La especie *Abies* tiene gran importancia ecológica y económica, provee de madera, leña y árboles de ornato en las fiestas navideñas, protección de cuencas hidrográficas, hábitat para la vida silvestre y lugares de recreo. *Abies religiosa* es la única especie de éste género que existe en el estado de México (Eguiarte, 1997).

Los encinos son abundantes en el estado de México, sobre todo en el noreste y noroeste, donde se ven grandes masas. Las especies de encinos en el país se estima que son entre 125 y 200, de las cuales 23 existen en el estado de México (Rzedowski y Equihua, 1987).

Los encinares se desarrollan en condiciones de clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Son un recurso forestal subutilizado debido a que de las aproximadamente 200 especies de encino existentes, sólo 60 presentan diámetros y alturas comerciales para la industria forestal (Martínez, 1981). Este hecho se debe principalmente a que la mayor parte de los bosques de *Quercus* de este país está formada por árboles bajos y con troncos más bien delgados. Además, los encinos son de crecimiento relativamente lento y los que alcanzan mayores tamaños tampoco se utilizan mucho, entre otras razones por la inaccesibilidad del terreno, porque no se conocen bien las características de su madera o porque se ignoran las técnicas para su debido secado (Rzedowski, 2006).

En cuanto al aspecto económico se sabe que la madera de encino es muy estimada por ser fuerte y durable; al trabajarla se le puede lograr un buen pulimiento. Se emplea de preferencia para muebles y construcciones finas y para hacer carbón; la corteza, por el tanino que contiene se usa en curtiduría (Martínez, 1954). Las **figuras 1a, 1b, 1c, 1d y 1e** muestran las especies utilizadas en el presente estudio.

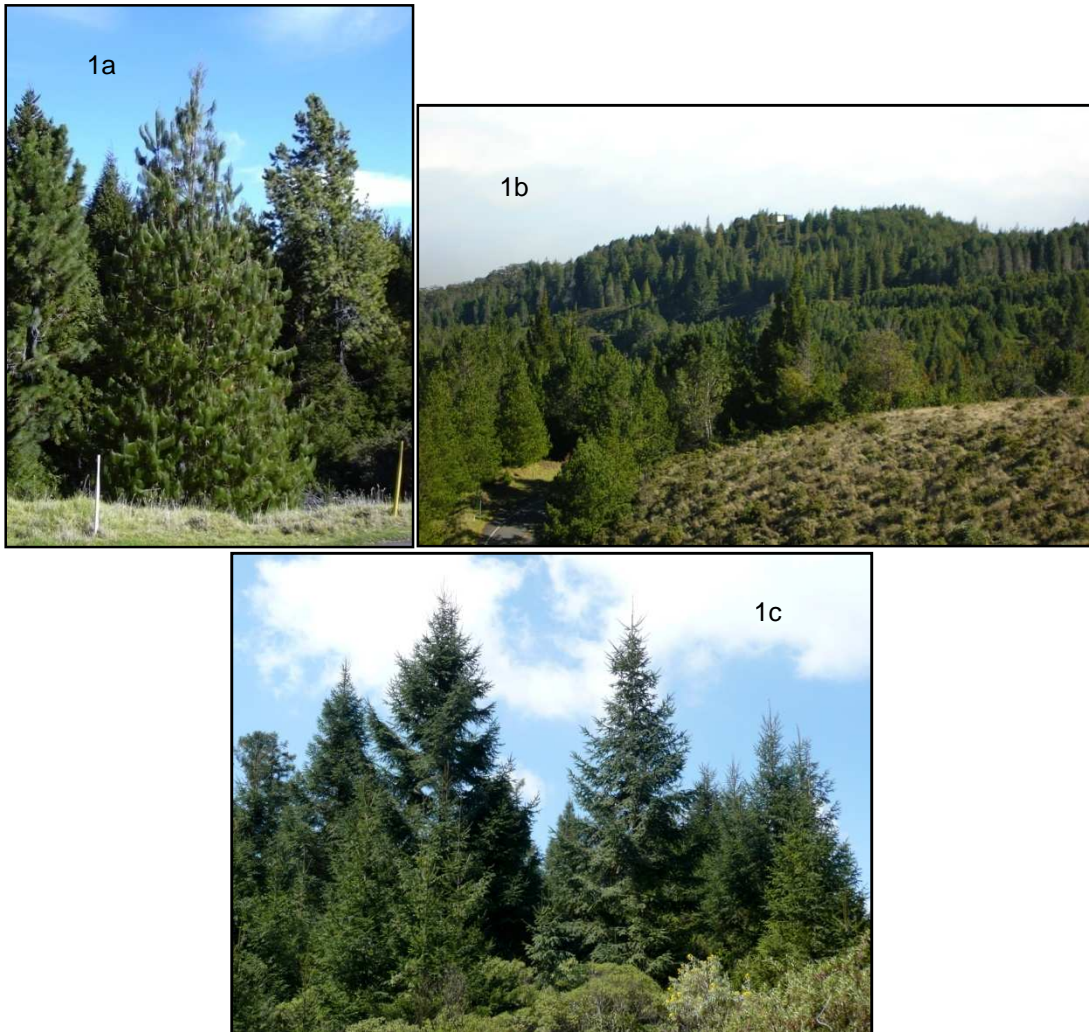


Figura 1a. *Pinus patula*. Fuente: <http://www.esacademic.com>
Figura 1b. Bosque de *Pinus patula*. Fuente: <http://commons.wikimedia.org>
Figura 1c. *Abies religiosa*. Fuente: <http://www.skyscrapercity.com>

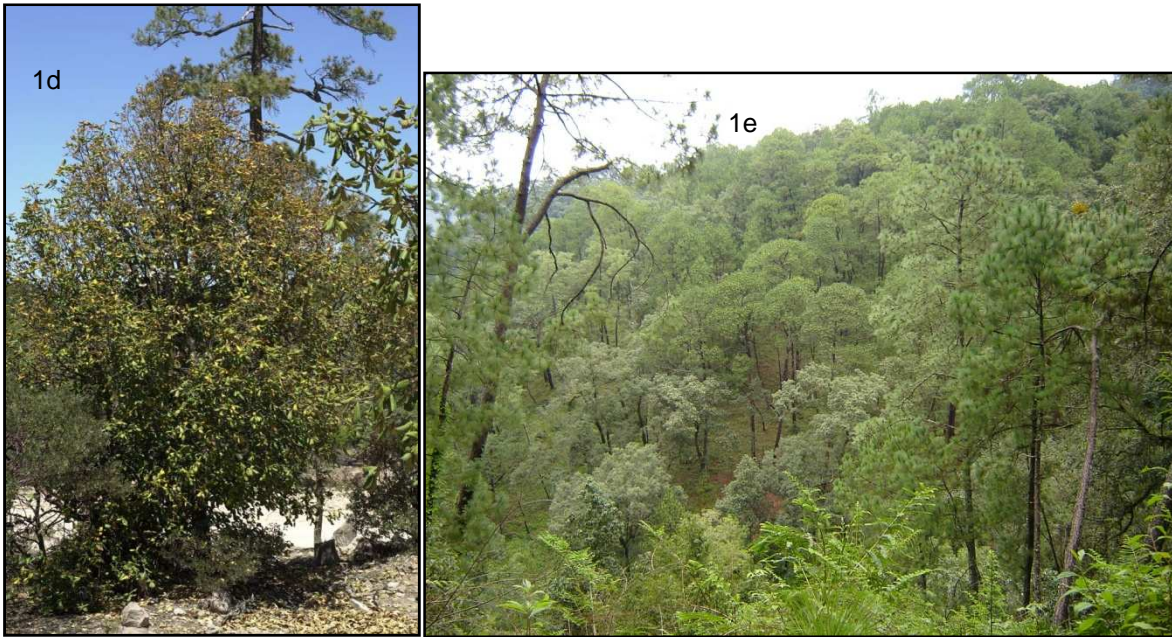


Figura 1d. *Quercus rugosa*. Fuente: <http://www.discoverlife.org>
Figura 1e. Bosque de encino. Fuente: http://148.202.114.7/eventos/Congreso_AMMAC/imagenes_ECLJ.htm

2.2.2. Aprovechamiento forestal maderable

En México, la producción forestal maderable ha sufrido varias fluctuaciones. Para poner un ejemplo tenemos que 1991 comenzó con un volumen reportado de 7.7 millones de m³r (metro cúbico rollo), seguido por una baja que llegó a un valor mínimo de 6.3 millones de m³r en 1995 (INEGI, 2008b).

A partir de 1996 se dio un aumento en la producción, la cual ascendió a 6.6 millones m³r; esta tendencia al aumento se mantuvo hasta el año 2000, en el que se reportó una producción de 9 millones de m³r. Posteriormente, se volvió a presentar una baja que culminó en 2008 con un volumen de 8.5 millones de m³r (INEGI, 2008a). El volumen de la producción forestal nacional maderable (m³) en rollo, por género, para los años 1996, 1998, 2000, 2005 y 2008 se presenta en la **tabla 2**.

Tabla 2. Volumen y valor de la producción forestal nacional maderable, por género, para los años 1996, 1998, 2000, 2005 y 2008

	1996	1998	2000	2005	2008
Volumen (metros cúbicos en rollo)					
Pino	5,783,299	6,970,689	7,506,673	4,870,130	4,810,499
Oyamel	140,054	271,297	412,420	151,891	127,868
Encino	578,687	692,915	918,603	731,025	496,818
Otras latifoliadas	77,684	125,645	187,632	156,711	69,844
Valor (miles de pesos)					
Pino	1,670,596	3,197,769	4,273,232	5,645,421	-
Oyamel	30,744	101,515	222,531	115,414	-
Encino	81,108	171,179	244,478	321,772	-
Otras latifoliadas	12,422,157	28,166	55,456	83,005	-

Elaborado con base en el Anuario estadístico INEGI, 2008b.

En la tabla 2 se aprecia un aumento progresivo en la producción de 1996 a 2000 a nivel nacional; en el 2000 se tuvo la mejor producción en cuanto a volumen y valor de la producción con respecto a los demás años. De 2000 a 2008, el volumen de la producción decreció. No se encuentran disponibles los datos para el valor de la producción para éste último año.

Con respecto al aprovechamiento forestal para el estado de México, se observa lo mismo que a nivel nacional; se experimenta un aumento progresivo en la producción en cuanto a volumen y valor de la producción entre los años 1996, 1998 y 2000. Después del año 2000 y hasta el 2008 la producción desciende. El encino disminuye su aprovechamiento del 2000 al 2005, pero hacia el 2008 llega los 18,566 m³r. Estas tendencias en el volumen y valor de la producción se muestran en la **tabla 3**.

De acuerdo con INEGI (2008), el total de la producción maderable para el estado de México toma en cuenta el conjunto de productos que se obtienen por género; estos son: escuadría (madera aserrada), celulósicos (pulpa para papel), chapa y triplay, postes, pilotes y morillos, leña, carbón y durmientes.

Tabla 3. Volumen y valor de la producción forestal maderable por género, 1996, 1998, 2000, 2005 y 2008 en el estado de México

	1996	1998	2000	2005	2008
Volumen (metros cúbicos en rollo)					
Pino	74,761	281,485	348,170	106,823	56,833
Oyamel	41,490	98,605	163,150	64,271	32,931
Encino	3,265	13,262	22,215	9,017	18,566
Otras latifoliadas	1,164	9,076	5,428	2,768	3,410
Valor (miles de pesos)					
Pino	10,798	144	224,234	96,643	55,981
Oyamel	5,542	59	104,816	51,980	31,940
Encino	111,000	3,515	213,379	4,510	8,725
Otras latifoliadas	60,000	1,753	1,946	734	1,022

Elaborado con base en el Anuario estadístico del estado de México, INEGI 1997, 1999, 2001, 2006 y 2009.

El estado de México, aunque no es uno de los principales productores de madera y recursos no maderables, en el caso de *Abies religiosa* ha sido uno de los estados con mayor producción de maderable, por lo que encuentra en el aprovechamiento forestal de esta especie una importante fuente de derrama económica (Semarnat, 2006).

2.3. Vulnerabilidad forestal ante el cambio climático

La vulnerabilidad en nuestro contexto se define como el grado por el cual un sistema es susceptible o incapaz de enfrentarse a los efectos adversos del cambio climático. La vulnerabilidad es función de la amenaza, de la sensibilidad del sistema y de su capacidad de adaptación (IPCC, 1998). Se da en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto un sistema, también de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación. La vulnerabilidad más importante de una sociedad se da en aquellos sistemas que son sensibles al clima, por ejemplo, los de abastecimiento de alimentos, infraestructura, salud, recursos hídricos, sistemas costeros, ecosistemas y ciclos biogeoquímicos, entre otros (Moreno y Urbina, 2008).

Los bosques contienen 80% de todo el carbono almacenado en la vegetación terrestre. Los bosques de Latinoamérica (los cuales ocupan aproximadamente 22% de la región y representan 27% de la cubierta forestal mundial) ejercen una fuerte influencia en el clima local y regional. Éstos juegan un papel importante en la acumulación global de carbono y contienen una importante parte de todas las especies de plantas y animales. Los estudios de vulnerabilidad indican que los ecosistemas forestales en muchos países podrían ser afectados por cambios climáticos (IPCC, 1998).

Dentro de los siguientes cien años, las temperaturas promedio se estima que aumenten de 2 a 5 °C. Para muchas especies arbóreas el aumento de 1 °C en la temperatura, puede significar un cambio en su distribución de 100 a 120 km en un lapso de tiempo mayor a 100 años. Un siglo puede no ser suficiente para que cualquier tipo de árbol se mueva más de unos pocos metros (Goodess *et al.*, 1992).

Los árboles necesitan agua para realizar sus procesos fisiológicos. El incremento de temperatura en los ecosistemas forestales puede provocar gran cantidad de evaporación en los suelos, lo que limita la disponibilidad de agua para los árboles, causando potencialmente un estrés de humedad que reduce su desarrollo (IPCC, 1998). Esto supondrá un importante factor de estrés para el arbolado, lo que en las zonas con déficit hídrico, puede ocasionar cambios en la densidad forestal o de otras especies vegetales. En casos extremos, áreas susceptibles de albergar sistemas arbolados pueden perder esta condición, pasando a soportar matorrales u otra vegetación de menor porte (Anónimo, 2006).

Las variaciones en temperatura y precipitación modifican la distribución, productividad, desarrollo y diversidad de las masas boscosas. La temperatura afecta directamente a los procesos bioquímicos y fisiológicos, mientras que la precipitación es el mayor insumo para la humedad del suelo. La humedad y la temperatura influyen directamente en la descomposición de la materia orgánica, la

cual afecta la disponibilidad de nutrientes para la vegetación. Las especies forestales más vulnerables son los bosques de coníferas, que experimentan una reducción en su extensión (Mansilla, 2007). La fisiología de las especies forestales puede verse profundamente afectada y, a raíz de esto, el consumo de carbohidratos en la renovación de estructuras celulares aumentará, disminuyendo así las reservas de la planta e incrementando su vulnerabilidad ante episodios adversos (Anónimo, 2006).

Se provocará un aumento o disminución del crecimiento en volumen por unidad de área de los bosques en función de la variación de temperatura y precipitación, lo cual incide directamente en la cantidad de carbono que puedan captar y almacenar del ambiente (Mansilla, 2007).

Con relación a los incendios forestales, el aumento de las temperaturas y la falta de agua en el suelo conducirán a una mayor y más duradera desecación de los combustibles (leña, hojarasca). Por lo tanto, la inflamabilidad de éstos aumentará y así lo harán la frecuencia, la intensidad y la magnitud de los incendios forestales. (Anónimo, 2006).

Las plagas y las enfermedades pueden jugar un papel fundamental en la fragmentación de las áreas forestales. Algunas especies perforadoras o defoliadoras pueden llegar a completar dos ciclos biológicos en un año o aumentar su área de colonización como consecuencia de los inviernos más benignos (Anónimo, 2006).

2.3.1 Estudios de vulnerabilidad forestal y escenarios posibles ante el cambio climático a nivel nacional

Los ecosistemas terrestres han sido sujetos a muchas presiones, como cambio de uso del suelo, contaminación, explotación inmoderada, ganaderización, introducción de especies exóticas, etc., por lo que el cambio climático se añade

como un factor más que puede hacer cambiar o poner en peligro la existencia de estos sistemas (Villers y Trejo, 2007).

La población en México es vulnerable a los extremos del clima. Dado que una vasta parte de nuestro territorio es semiárido, las variaciones en la temporada de lluvias se convierten en amenaza de sequía y, con frecuencia, en desastres para sectores dependientes del agua. Es por ello que para nuestro país el manejo adecuado de este recurso se ha vuelto prioritario (Magaña *et al.*, 2004).

El análisis de la vulnerabilidad de una región ante el cambio climático permite determinar estrategias de adaptación y mitigación. La comparación entre las condiciones actuales y las potenciales, permite la identificación y la cuantificación del grado de vulnerabilidad de los lugares donde se tendrían efectos adversos como la reducción en rendimientos agrícolas, la disminución del nivel de los cuerpos de agua y la reducción de superficies forestales (Magaña *et al.*, 2004).

Magaña y Gay (2002) señalan que las variaciones en el ciclo hidrológico para México estarán estrechamente relacionadas con la ocurrencia del fenómeno El Niño. Las tendencias indican un aumento en las lluvias en la región norte del país mientras que en el sur la tendencia es negativa. Dicho análisis muestra que la presencia más frecuente e intensa de este fenómeno en las últimas dos décadas, han dejado una señal en la lluvia acumulada anual. Por tanto, El Niño es un fenómeno de gran importancia como modulador de las lluvias en México. Las repercusiones de El Niño en verano en gran parte de México se traducen en una disminución generalizada de las lluvias. El déficit en precipitación puede ser tan severo como para traducirse en sequías y problemas por la falta de agua. Tan grave fue la sequía en 1997 y parte de 1998, que la agricultura tuvo enormes pérdidas y se obtuvo un récord en incendios forestales (Magaña y Gay, 2002).

Los estudios de impacto y de vulnerabilidad de ecosistemas forestales frente al cambio climático en México se han generado a partir de Modelos de Circulación

General de la Atmósfera, en los cuales se considera un incremento al doble en la concentración del CO₂ emitido a la atmósfera (Gay 1999, citado por Villers y Trejo, 2007).

Los resultados que se obtienen al aplicar los modelos Geophysical Fluids Dynamic Laboratory (GFDL-R30), el Canadian Climatic Center Model (CCCM), y el modelo de sensibilidad en donde se supone un incremento en la temperatura de +2°C y -10% en la precipitación, proporcionan distintos escenarios del impacto de los cambios en el clima sobre los ecosistemas; también indican las posibles modificaciones de la distribución de la vegetación, en el caso de que esta redistribución fuera posible y, si el tiempo fuera suficiente, para permitir este tipo de adaptaciones a las nuevas condiciones climáticas. Las predicciones en el cambio de la vegetación se basan en el supuesto 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 forma que conociendo los cambios de temperatura y precipitación que se podrían suscitar, sería posible conocer qué tipo de vegetación correspondería a esas nuevas condiciones (Villers y Trejo, 2007).

La incertidumbre respecto a los cambios en los regímenes de lluvia es muy amplia, fundamentalmente si se considera que uno de los factores importantes a conocer es cómo será la distribución de la precipitación a lo largo del año y qué tan concentradas podrán ser esas lluvias (Condit, 1998).

En cuanto a la temperatura, los tres modelos aplicados prevén un aumento, por lo cual, el impacto más significativo ocurriría en las zonas templadas, en donde se establecen comunidades vegetales como los bosques de coníferas (pinos, abetos) o latifoliadas (como los encinos), pastizales naturales y matorrales. Todas las especies que forman este tipo de comunidades no soportan las condiciones cálidas, lo cual significa que no poseen las adaptaciones para soportar esas temperaturas. Estos cambios en la temperatura tendrían efectos drásticos en la

distribución de la vegetación de esas zonas y su distribución se vería dramáticamente reducida, e incluso en algunos casos podría llegar a desaparecer (Villers y Trejo, 2007).

Por otro lado, existe una tendencia a la aridez, lo que favorece las condiciones para una ampliación de comunidades como las de bosques secos y bosques tropicales caducifolios, adaptadas a estas condiciones, pero en decremento de las comunidades de bosques templados y de las de alta montaña (Martínez *et al.*, 2004).

2.4. Acciones de adaptación y mitigación ante el cambio climático

Adaptación es el proceso de ajuste a nuevas condiciones. En el contexto de un cambio climático, usualmente se refiere a las medidas emprendidas por los humanos, más que como adaptación autónoma (Kates, 1985, citado en Bouma, 1996). Las medidas de adaptación desarrolladas para responder a cambios esperados en el clima, incluyen políticas estratégicas diseñadas para compensar los costos y aumentar los beneficios que se podrían obtener con un cambio climático (IPCC, 1991, citado en Bouma, 1996). El IPCC (1998) define este concepto como los ajustes en las prácticas, procesos o estructuras en respuesta a los cambios proyectados o reales en el clima. Los ajustes pueden ser espontáneos o planeados, de reacción o anticipatorios. Estas acciones pueden reducir los impactos negativos o tomar ventaja de nuevas oportunidades que se presenten al cambiar las condiciones del clima.

La adaptación se da dentro de una variedad de niveles socioeconómicos y políticos; las estrategias desarrolladas por los gobiernos, son políticas de adaptación (IPCC, 1998). Pueden hacerse a través de tecnologías, comportamiento individual, organización social, normas y políticas, actividades económicas o educación. La capacidad de adaptación varía entre países y

poblaciones y, depende, entre otros factores, de los recursos disponibles, el grado de desigualdad social que exista, la fuerza de las instituciones públicas, así como las prioridades y la voluntad de los que toman decisiones (Stratus Consulting *et al.*, 2004).

La mitigación es la intervención humana para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de GEI (Anónimo, 2006). Para el IPCC, la mitigación es la intervención antropogénica para reducir el forzamiento antropogénico del sistema climático, es decir, reducir la sobreproducción de GEI; incluye estrategias para reducir las fuentes productoras de estos gases y las emisiones, así como para aumentar los sumideros de carbono (IPCC, 2007). La disminución de la deforestación y la ayuda a la regeneración, la repoblación forestal y la agrosilvicultura constituyen las principales medidas de mitigación para la conservación y el secuestro de carbono. (IPCC, 1996).

El desarrollo de nuevas opciones tecnológicas que promuevan una baja intensidad en la producción de dióxido de carbono y los costos económicos de los procesos de mitigación, serán significativos en áreas como la energía o el transporte o la conservación forestal, lo que modificará los patrones de desarrollo económico actuales (Galindo, 2008).

La reducción de la vulnerabilidad forestal actual puede ayudar a aumentar la resistencia contra los impactos del cambio climático. En México, ya se han iniciado algunas acciones preventivas como la planeación de actividades agrícolas en función de los pronósticos de lluvia, la administración de agua en presas (sequía versus inundaciones) determinando prioridades productivas de las regiones (irrigación, ganadería, usos domésticos, industriales, turísticos, hidroeléctricas, etc.), la implementación de programas de alerta en las zonas urbanas por inundaciones y deslaves, y la elaboración de pronósticos para la prevención de incendios forestales, entre otras (Magaña, 2002).

2.4.1. Estrategias de adaptación y mitigación en el sector forestal

El protocolo de Kyoto se concentró principalmente en reducir las emisiones de CO₂ y otros GEI y, en reducir las emisiones por deforestación como segunda prioridad. Las propuestas para integrar el combate contra la deforestación en el acuerdo de cambio climático post Kyoto hacia el 2012 han evolucionado con el tiempo. Inicialmente el enfoque estaba centrado en reducir las emisiones por deforestación (RED), pero las negociaciones actuales se están enfocando en la reducción de emisiones por deforestación y por degradación de los bosques (REDD). Las iniciativas más recientes incluyen considerar la deforestación, la degradación y el aumento de las reservas de carbono forestal (REDD-plus) (UNDESA, 2009).

La deforestación es considerada la segunda fuente más importante de producción de GEI inducida por la actividad humana; es responsable de aproximadamente 20% de las emisiones totales. La degradación forestal es también una fuente importante de producción de carbono atmosférico. La degradación se refiere a la reducción gradual de biomasa dentro de los bosques sin llegar a ser el resultado del cambio de uso de suelo. En este proceso gradual, estas biomasa pueden permanecer degradados por mucho tiempo antes de que el suelo tenga otros usos. En algunos casos la degradación forestal puede dar como resultado pérdidas de carbono de la misma magnitud que la deforestación. Al tratar explícitamente con este fenómeno, un mecanismo REDD, podría parar esta progresión y dejar las masas forestales intactas. Esto no solamente previene emisiones, sino que también es críticamente importante en la preservación de la biodiversidad (Anónimo, 2009).

El mejoramiento del control de incendios, por ejemplo, al simplificar la toma de decisiones, al construir una mejor capacidad institucional y al usar nuevas tecnologías para proveer información sobre los recursos forestales, también puede reducir las emisiones. Existen muchas estrategias que pueden aliviar las presiones

de la recolección de madera como combustible, el cual es un gran conductor hacia la degradación forestal en muchos países desarrollados; éstas incluyen la promoción de estrategias agroforestales, la sustitución o plantación de nuevos árboles, la utilización de paredes rompevientos, y el reemplazo de estufas consumidoras de leña (UNDESA, 2009).

Hasta el momento, las respuestas y las políticas del sector forestal en los países en vías de desarrollo frente al cambio climático, han sido, en su mayoría, de ausencia de cualquier tipo de intervención y, en el mejor de los casos, de adaptación reactiva, es decir, se ejecutan cuando hay que superar una dificultad. Los diferentes valores e intereses de las partes involucradas, los cuales pueden impedir alcanzar consensos sobre metas de adaptación, necesitarán ser dirigidos hacia esfuerzos para fomentar la adaptación proactiva. Las estrategias proactivas (adaptación planificada o anticipada), implican que las metas y prácticas forestales se definan anticipadamente y en previsión de riesgos e incertidumbres ligados al cambio climático (IUFRO, 2009 y Bernier, 2009).

En la adaptación planificada, las intervenciones son deliberadas, anticipadas y se llevan a cabo en diferentes niveles y sectores. En el plano comunitario, puede consistir en diversificar las fuentes de ingreso forestal y no forestal, promover una mejor administración de los recursos forestales y crear capacidades para vigilar y hacer frente a posibles calamidades de proporciones sin precedentes (Bernier, 2009).

En el sector forestal industrial, este tipo de acciones implicarían incluir entre los productos a la bioenergía, o promover la manufactura de productos madereros debido a su pequeña emisión de carbono. A escala nacional y mundial, la adaptación planificada puede incluir un sistema de seguimiento y presentación de informes y la creación de instrumentos para la evaluación de la vulnerabilidad, y el diseño de planes con vistas a la adaptación (Bernier, 2009).

Este conjunto de acciones significa también sopesar nuevas oportunidades que pueden surgir a partir de efectos del cambio climático, por ejemplo, la conveniencia de plantar una especie que crecerá más rápidamente en las condiciones proyectadas u obtener beneficios de productos y servicios tales como el secuestro de carbono y los nuevos tipos de bioenergía. Mediante la adaptación planificada se puede reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia, o privilegiar la diversificación a expensas de la productividad (IUFRO, 2009 y Bernier, 2009).

A nivel del rodal, la adaptación planificada haría necesario plantar una más abundante diversidad de especies o de árboles seleccionados por su resistencia a eventuales agentes estresantes. A nivel del paisaje, puede comprender medidas destinadas a minimizar los efectos potenciales de incendios, ataques de insectos y enfermedades y a incrementar la forestación o reforestación, la instauración de corredores de biodiversidad y la rehabilitación de bosques degradados. Un elemento esencial de este tipo de adaptación es la vigilancia forestal intensiva, la cual es un instrumento que proporciona indicaciones de alerta temprana sobre la muerte regresiva del bosque y los brotes de insectos y enfermedades, ayudando a reducir la inseguridad a la hora de diseñar planes y a minimizar las pérdidas (IUFRO, 2009 y Bernier, 2009).

Los países en desarrollo padecen la carencia de financiamiento y de conocimiento en materia de control y evaluación, los cuales pueden impedir la puesta en práctica de las medidas de detección temprana del impacto del cambio climático y las oportunas respuestas. Ante estas insuficiencias, la adaptación planificada debería, sobre todo, crear capacidad para la realización de evaluaciones forestales periódicas. Existe una reticencia natural de las personas a nuevas formas de organización. Por lo tanto, el reto que tiene la adaptación planificada es poder flexibilizar la cultura organizativa, las estructuras establecidas y las políticas de ordenación forestal antes de que estalle un episodio de crisis (Bernier, 2009).

La vulnerabilidad de los ecosistemas forestales se puede mitigar reduciendo su exposición al cambio climático a través de sistemas de preparación y alerta temprana de riesgos, la quema controlada y otras medidas para reducir la acumulación de material combustible; por ejemplo se puede disminuir su sensibilidad al cambio climático mediante la plantación de especies más resistentes, el aumento de la capacidad de almacenamiento de los embalses ayuda a evitar las tensiones por escasez de agua en condiciones de sequía; también se puede mantener o aumentar la resistencia del arbolado, por ejemplo, mediante la explotación forestal de efectos reducidos, o mediante la tala en arboledas demasiado densas (Seppala, 2009).

Medidas de ese tipo se pueden poner en práctica en el marco de un ordenamiento forestal sostenible, que es un sistema en evolución de las prácticas forestales, destinado a garantizar que los bienes y servicios derivados de los bosques satisfagan las necesidades actuales, al mismo tiempo que aseguran su disponibilidad continua y su contribución al desarrollo económico a largo plazo (Seppala, 2009).

La producción y uso de productos provenientes de bosques ordenados de modo sostenible, contribuye a las acciones de mitigación, porque la madera es uno de los pocos materiales auténticamente renovables, y los productos madereros tienen la capacidad de almacenar carbono, a diferencia de las grandes cantidades de GEI expulsados hacia la atmósfera en los procesos de producción industriales con insumos derivados del petróleo. En muchos países, las inversiones en una producción maderera que recurre a prácticas silvícolas mejoradas o a bosques plantados, constituyen una solución en la que se combinan tanto la mitigación como la adaptación (Bernier, 2009).

Estas opciones de mitigación y de adaptación frente el cambio climático (potencialmente muy eficaces) sólo podrían tener éxito a través de la ordenación forestal sostenible y con la garantía de que las intervenciones de mitigación

apoyen los planes locales de adaptación de poblaciones y comunidades. Existe evidencia suficiente para sostener que las comunidades y ejidos logran manejar sus bosques de forma sustentable y que los usan para generar ingresos cuando reciben apoyos adecuados. Los datos sugieren que en los bosques comunitarios bien manejados se conserva la cobertura forestal tan bien o mejor que en las áreas naturales protegidas (Bray, 2007).

Otras medidas de adaptación de acuerdo con Cáceres (2001) son:

- Formar masas forestales para controlar procesos erosivos, regular el régimen hídrico, captar CO₂ y disminuir su vulnerabilidad frente al Cambio Climático.
- Mejorar las condiciones ambientales de las zonas críticas mediante la implantación de masas forestales de protección ambiental.
- Aumentar la capacidad de retención de agua por medio de las plantaciones, para reactivar el ciclo hidrológico.
- Proteger la biodiversidad de plantas y animales y, por lo tanto, sus interrelaciones y el papel ecológico dentro del ecosistema.
- Formular e implementar un programa de desarrollo rural integral, considerando el manejo sustentable de las cuencas hidrográficas para preservar el recurso suelo, la vegetación y el agua.
- Fomentar la plantación de árboles y arbustos en asociación con cultivos agrícolas, a fin de que las especies plantadas ofrezcan beneficios adicionales a los propietarios, como madera, leña, frutos, protección de los cultivos, mejoramiento de suelos, etc.
- Incrementar la utilización de especies forestales de usos múltiples, que proporcionen forraje y leña y disminuyan el deterioro del suelo por el sobrepastoreo en áreas críticas.
- Fomentar el establecimiento de plantaciones forestales de calidad y propiciar su adecuado mantenimiento y reposición, con la finalidad de producir

materias primas industriales y de disminuir la presión sobre los bosques nativos.

- Conservar un banco genético de especies vegetales y animales adaptadas al cambio climático.

Para el caso de México, la forestación y la reforestación pueden utilizarse para acrecentar los depósitos y sumideros de carbono. La deforestación es un problema muy significativo para el país, debido a que su tasa anual es la mayor del mundo (Serrano, 2002).

A partir del reconocimiento de la importancia que tienen los recursos forestales desde el punto de vista económico, social y ambiental, se han hecho propuestas políticas tendientes a revertir el grave proceso de deforestación que se observa en México; aunque, por un lado, se han promovido planes orientados a la producción agrícola mediante el Programa de Apoyos Directos al Campo (Procampo) que han inducido los desmontes y, por el otro, el mismo gobierno federal ha realizado esfuerzos para reforestar a través del Pronare (Serrano, 2002).

La política nacional en materia de recursos naturales (Semarnap, 1998) establece las siguientes estrategias que tienen efectos sobre la adaptación y la mitigación de GEI:

- Incremento de la captura de carbono. Incluye prácticas de gestión forestal destinadas a la expansión de los ecosistemas forestales a través del aumento de la superficie y/o la biomasa y la densidad de carbono en el suelo.
- Conservación del carbono capturado en la vegetación forestal y el suelo. Se incluyen medidas dirigidas a conservar la biomasa ya existente, a través del abatimiento de la actual tasa de deforestación, la reducción de los factores de riesgo y las medidas de apoyo a la regeneración natural de bosques y selvas.

También se trabaja en la identificación de áreas propicias para la producción sustentable, estimación del potencial de aprovechamiento de especies vegetales

de la selva baja caducifolia, y en el reconocimiento de patrones migratorios y de modificación de comunidades vegetales con el ascenso de la temperatura (Semarnat-INE, 2008).

Capítulo 3. Estimación de la distribución de especies forestales bajo escenarios de cambio climático

3.1. Objetivos

Objetivo general

- Generar propuestas de adaptación y mitigación para especies forestales ante los escenarios de cambio climático proyectados para los años 2030 y 2050 en el estado de México.

Objetivos particulares

- Evaluar la aptitud actual del terreno para tres especies forestales.
- Evaluar la aptitud del terreno para tres especies forestales utilizando escenarios de cambio climático para los años 2030 y 2050, correspondientes a dos modelos de Circulación General de la Atmósfera.
- Proponer acciones de adaptación y mitigación para las tres especies seleccionadas, en respuesta a las proyecciones estimadas con los escenarios de cambio climático empleados.

3.2. Justificación del estudio

El cambio climático en los últimos años ha sido más marcado en los diferentes eventos meteorológicos que son cada vez más extremos; entre sus efectos se presentan principalmente alteraciones en la temperatura y precipitación (Villers y Trejo, 2007). Por consiguiente, los recursos naturales y los seres humanos están siendo afectados en lo ambiental, social y económico. La vegetación es uno de los recursos naturales más vulnerable ante el cambio climático y, consecuentemente, los bosques manejados y los aprovechamientos forestales (Mansilla, 2007).

Así, las modificaciones del clima generarán una desadaptación de las poblaciones de especies forestales en los sitios en donde crecen actualmente. Las plantas sufrirán gradualmente mayor estrés hídrico por el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación. El estrés puede causar el deterioro y eventualmente la muerte de la cubierta vegetal. Por ello, es importante predecir en qué magnitud cambiará el clima, cuándo ocurrirán esos cambios, cómo afectará a la vegetación y, qué podemos hacer para aminorar los efectos negativos del cambio climático sobre las especies vegetales (Saenz, 2010).

En la actualidad, diversos sectores sociales están buscando estrategias para enfrentar el cambio climático a través de medidas de mitigación y adaptación con el propósito de conservar los recursos naturales; si continúa la problemática del clima, se ocasionarán problemas socioeconómicos para la población humana. Las estrategias de adaptación y mitigación aplicadas deben ser ajustadas según los cambios y variaciones del clima proyectados para el territorio de interés (Lindner *et al.*, 2000).

Debido a que los bosques de climas templados son más vulnerables a los efectos del cambio climático (Mansilla, 2007), el estudio se concentró en el análisis de la aptitud de especies forestales de este tipo de clima, con el fin de localizar las nuevas áreas con potencial para el desarrollo de estas especies de importancia

socioeconómica para el estado de México, de acuerdo con los nuevos escenarios de temperatura y precipitación.

3.3. Características del medio físico del estado de México

3.3.1. Localización

El estado de México es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana, se localiza en la zona centro del país, entre las coordenadas extremas de los paralelos 18°21'29" a 20°17'20" de latitud norte y entre los meridianos 98°35'50" a 100°36'34" de longitud oeste. La extensión territorial del estado es de 22,499.95 km², cifra que representa el 1.09 % del total del país. Su ubicación se muestra en la **figura 2**.

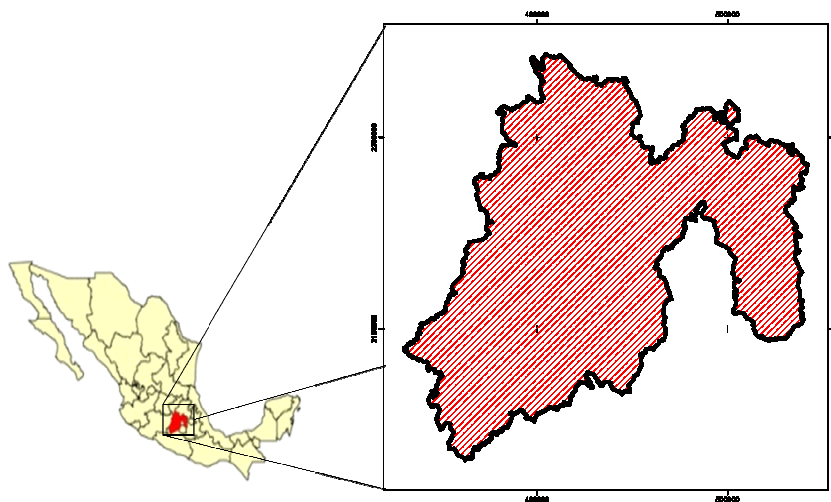


Figura 2. Ubicación del estado de México en la República Mexicana

El estado presenta un amplio rango altitudinal de 200 a 5,500 msnm (INEGI, 2007). En la **figura 3** se muestra la entidad federativa con sus diferentes rangos altitudinales.

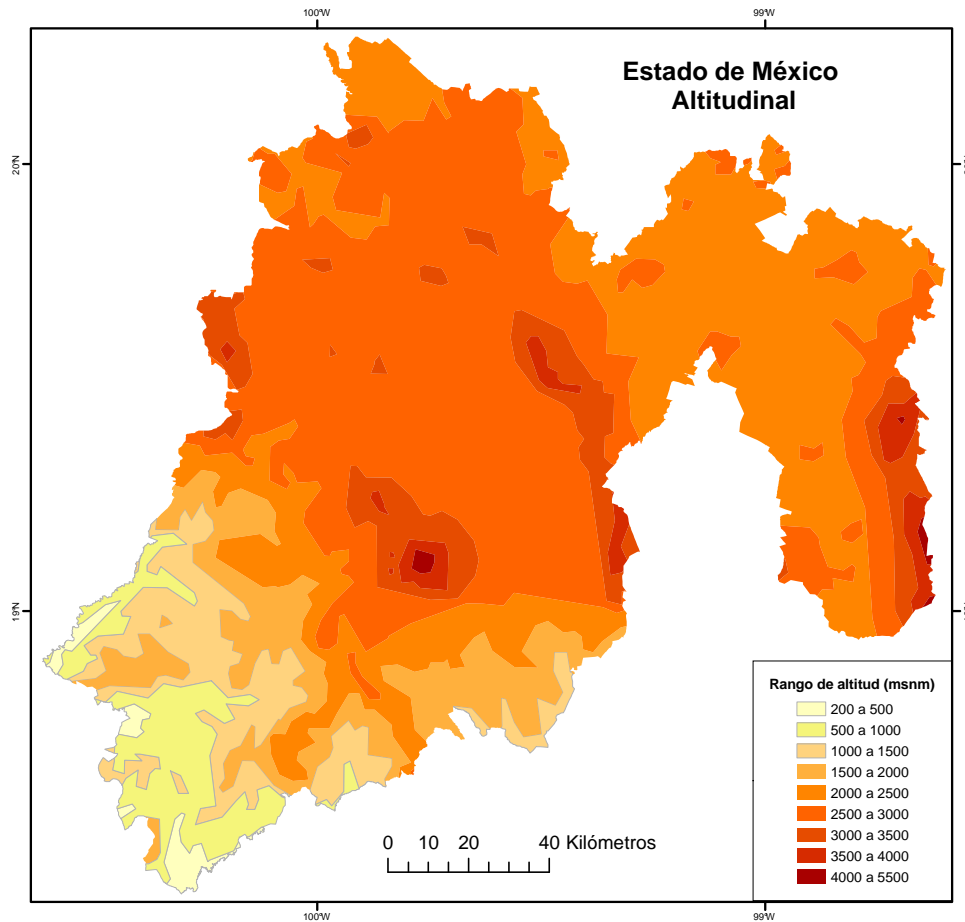


Figura 3. Rangos de altitud en el estado de México. Elaborado con base en la Carta de Hipsometría de INEGI, digitalizada por Conabio (1999).

3.3.2. Fisiografía y orografía

De acuerdo con INEGI (2007) el estado está dividido en dos provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico, que abarca la mayor parte, y Sierra Madre del Sur. La primera se forma con las subprovincias Mil Cumbres, Llanos y Sierras de Querétaro e Hidalgo y Lagos y Volcanes de Anáhuac. La segunda se forma con las subprovincias Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses. Las cinco principales elevaciones en el estado (msnm), son las siguientes: Volcán Popocatepetl (5500), Volcán Iztaccíhuatl (5200), Nevado de Toluca (Volcán Xinantécatl) (4680), Cerro el Mirador (4120) y Cerro Telapón (4060). En la **figura 4** se muestran las provincias y subprovincias fisiográficas presentes la entidad.

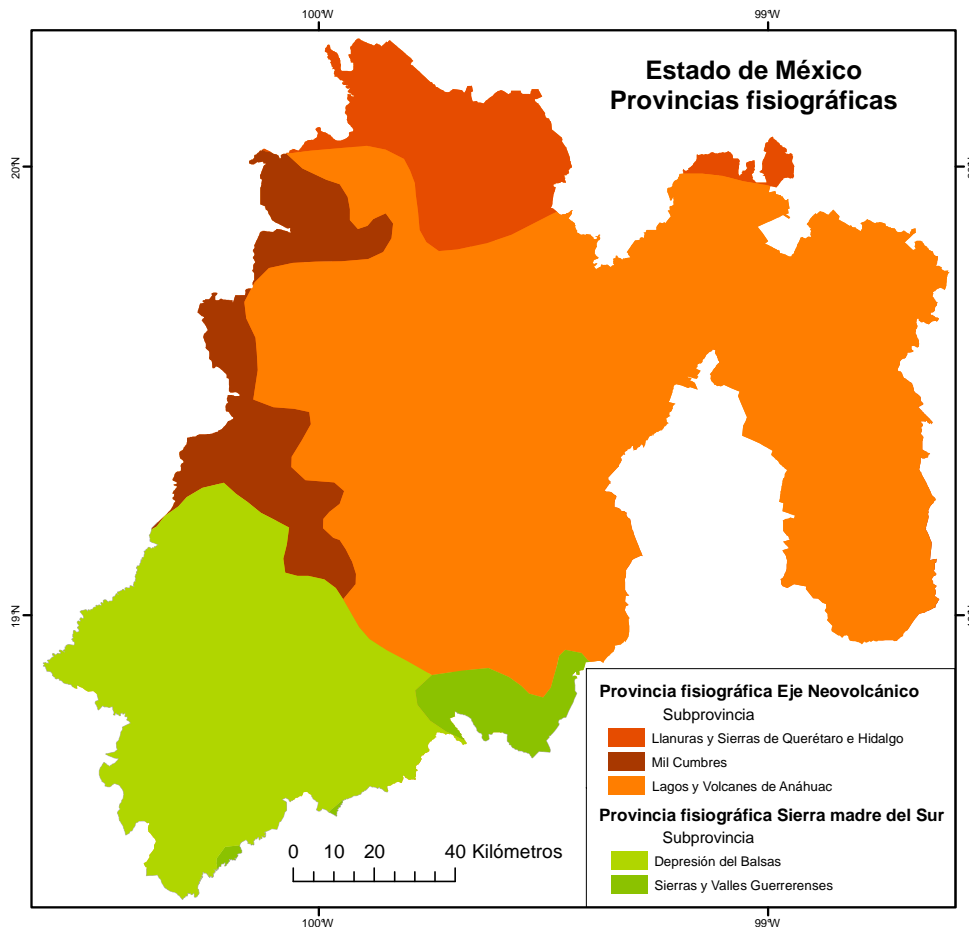


Figura 4. Provincias fisiográficas en el estado de México. Elaborado con base en el mapa de Cervantes *et al.* (1990).

3.3.3. Suelos

Las unidades edáficas con mayor presencia en el territorio estatal son los suelos feozem y andosol, que son de origen sedimentario e ígneo, respectivamente; cubren 45% de la extensión territorial de la entidad. Los suelos cambisoles, luvisoles, regosoles y vertisoles se presentan en 37% del territorio. Los suelos con menor presencia en el estado son los fluvisoles, el gleysol mólico, el histosol éutrico, el ranker y la rendzina que, en conjunto, representan 5.6% del total de la superficie. Las clases texturales predominantes en los suelos para esta entidad son la media y la fina, las cuales representan cerca de 85% del total de la superficie estatal. La **tabla 4** contiene las unidades de suelo existentes en la entidad (INEGI, 2007), mientras que en la **figura 5** se muestra su distribución.

Tabla 4. Suelos presentes en el estado de México

Unidad		Clase textural		% de la superficie estatal
Clave	Nombre	Clave	Nombre	
A	Acrisol	3	Fina	1.85
B	Cambisol	2	Media	7.66
E	Rendzina	2	Media	2.04
H	Feozem	2	Media	23.32
I	Litosol	1	Gruesa	1.96
L	Luvisol	3	Fina	7.35
R	Regosol	1	Gruesa	12.77
T	Andosol	2	Media	22.65
V	Vertisol	3	Fina	9.41
W	Planosol	2	Media	4.22
Z	Solonchak	3	Fina	1.17
O	Otros			5.60

INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Edafológica, 1:250,000. Serie I.

3.3.4. Hidrología

El estado está conformado por tres regiones hidrológicas: Lerma-Santiago, con una superficie que representa 23.75% de la superficie de la entidad, Balsas, con 41.86% y Pánuco, la cual abarca 34.39%. La región hidrológica Lerma-Santiago contiene la cuenca del Lerma-Toluca; la región hidrológica del Balsas comprende principalmente las cuencas del Balsas-Zirándaro, la de Atoyac, la Grande de Amacuzac y la del Cutzamala; la región hidrológica Pánuco encierra la cuenca Moctezuma (INEGI, 2007).

Los cauces principales de la región hidrológica Lerma-Santiago son: Santiaguito, Verdiguél, Tejalpa, Mayorazgo, Almoloya de Juárez, La Gavia, Santo Domingo, Sila, Jaltepec, y Lerma. Las afluencias más importantes de la región hidrológica del Balsas son: Tilostoc, Bejucos, Almoloya, San Jerónimo, Chalma, San Antonio, Palmar Grande, Acatitlán, Poliutla, Achichipilco, Barranca del Volcán, Atoyac, Volcán de Otumba, Balsas-Zirándaro, Grande Amacuzac, Temascaltepec y Cutzamala. En la región hidrológica Pánuco se ubican las corrientes: Moctezuma,

Pánuco, San Juan Teotihuacán, Papalotla, Texcoco, Amecameca, Cuautitlán, San Javier, Tlalnepantla, La Cofradía, Nado, El Encinal y Arroyo Zarco (INEGI, 2007).

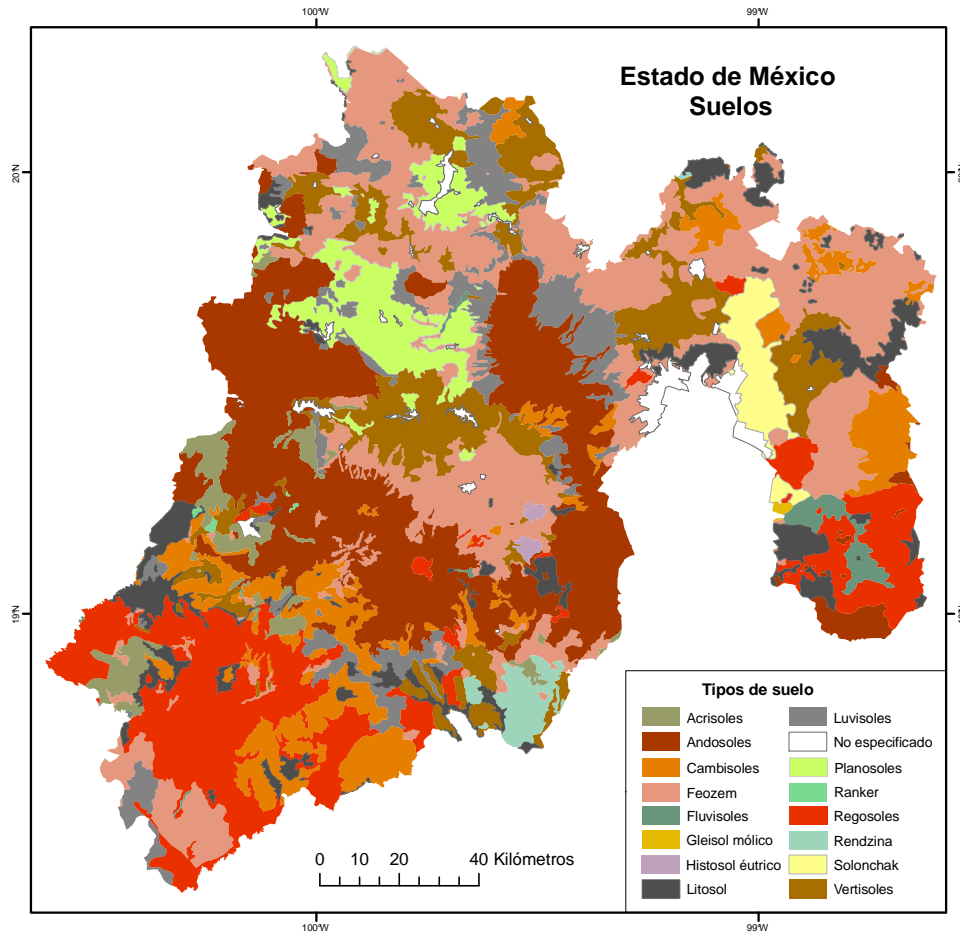


Figura 5. Suelos predominantes en el estado de México. Elaborado con base en el Mapa edafológico de INIFAP y Conabio (1995).

3.3.5. Climas

De acuerdo con García y Conabio (1998), los climas existentes y su distribución dentro del estado son el clima templado subhúmedo (Cw), es el más ampliamente distribuido, representa 60.47% de la superficie estatal, se localiza en los valles altos del norte, centro y este; el templado, semifrío subhúmedo Cb'(w2) se presenta en 13.67% y se localiza la parte central, este y oeste del estado; el semicálido templado subhúmedo ((A) Cw) abarca 11.77% y se encuentra en el suroeste; 10.33% de la superficie tiene un clima cálido subhúmedo (Aw) y se

encuentra hacia el suroeste; el clima semiárido templado (BS1k), presente en el noreste, representa 3.64% y, 0.12% de la entidad corresponde al clima frío (E(T)CHw), que se localiza en las partes altas de los volcanes.

Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre; la precipitación media del estado es de 900 mm anuales. La temperatura media anual en el estado es de 14.7°C, las temperaturas más bajas, que se registran en el estado, se presentan en los meses de enero y febrero y son de alrededor de 3.0°C. La temperatura máxima promedio se presenta en abril y mayo, y es de alrededor de 25°C. La **figura 6** muestra la distribución de los climas en el estado de México.

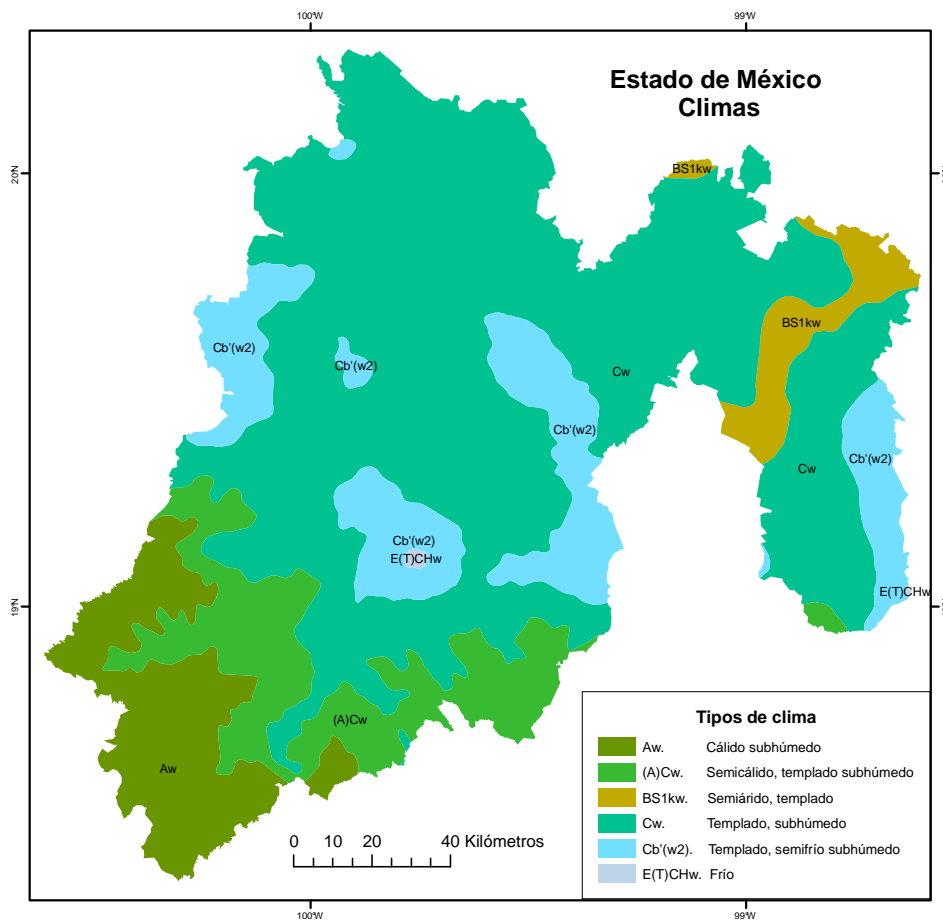


Figura 6. Climas del estado de México. Elaborado con base en el mapa de Climas de García y CONABIO (1998).

3.3.6. Vegetación

INEGI (2008a) menciona que en cuanto a biomas se refiere, la flora del estado de México tiene gran diversidad, que va desde la vegetación de zonas áridas hasta los páramos de alta montaña. La mayor concentración y diversidad forestal se encuentra en el interior de la cuenca del río Balsas y en los principales sistemas montañosos como las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, de Las Cruces, del Ajusco, de Río Frío y Nevada; en menor proporción se encuentran en la sierra de San Andrés, mesa de Los Pinos y la sierra de Carimangacho, al norte del estado. Otras regiones de poca extensión están caracterizadas con vegetación de tipo pastizal y acuática.

La vegetación en el estado de México representa un poco más de la mitad de la superficie de la entidad, según INEGI (2005). Consta de los siguientes tipos:

Los bosques ocupan 27.81% del territorio estatal; algunas especies útiles son: oyamel, ocote blanco, pino chino, encino quebracho y encino laurelillo. Los pastizales, abarcan 14.47% del área estatal; algunas especies útiles son: navajita, zacate, zacate chino y zacatón. Las selvas ocupan 5.67% de la superficie de la entidad; algunas especies útiles son: huizache, cazahuata, copal, vara dulce y palo brasil. El matorral, ocupa 0.90% de la superficie estatal; algunas especies útiles son: nopal, uña de gato y sangre de drago. Los restantes tipos de vegetación incluyen palmar inducido, tular y vegetación halófito y se extienden en conjunto dentro del 3.72% de la superficie estatal. La distribución de los tipos de vegetación se muestra en la **figura 7**.

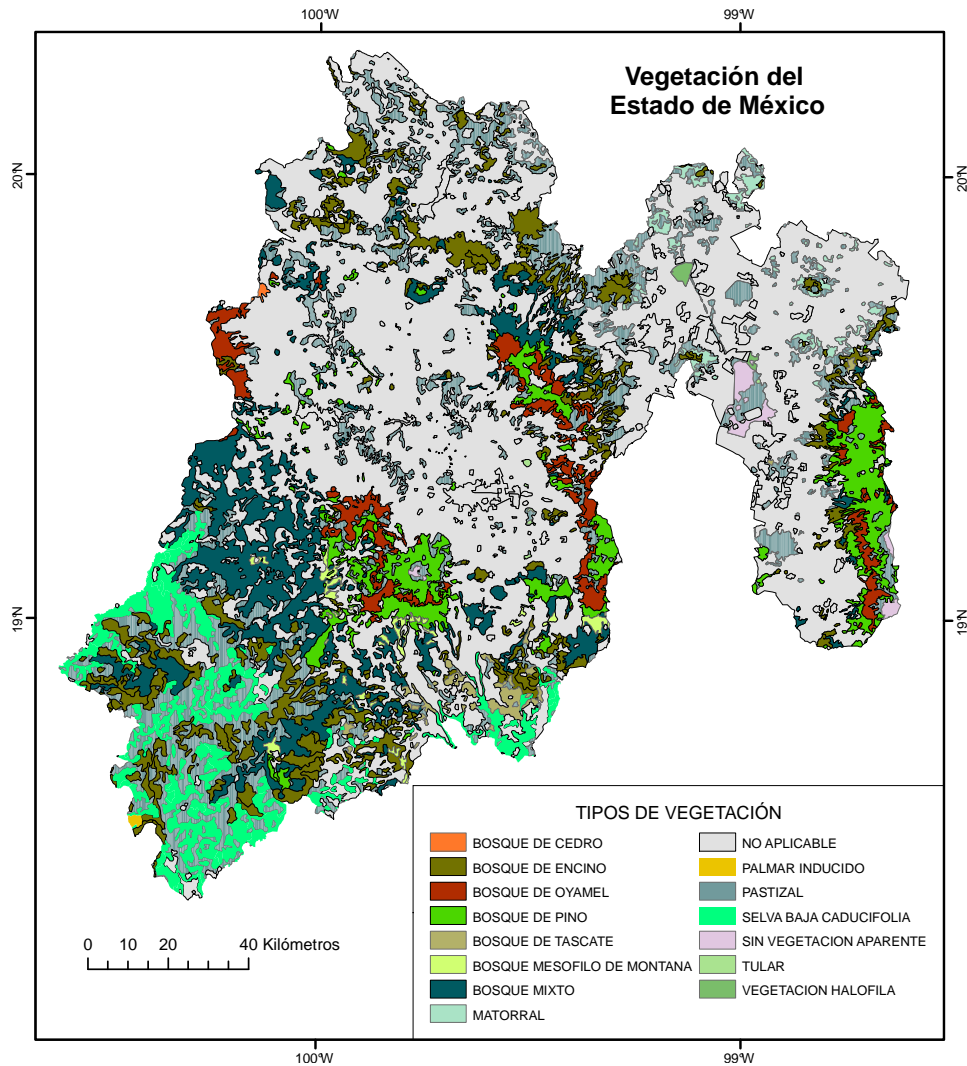


Figura 7. Tipos de vegetación en el estado de México. Elaborado con base en la Serie III. Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación del estado de México. INEGI (2005).

3.4. Descripción del método

3.4.1. Selección de especies forestales evaluadas

Se consideraron tres especies para este estudio a partir de la consulta de información en diversas fuentes bibliográficas y electrónicas, éstas son: *Pinus patula* (pino, pino chino, etc.), *Abies religiosa* (oyamel, abeto) y *Quercus rugosa* (encino quebracho, encino roble, palo colorado, etc.).

Se eligió *Pinus patula*, por tener una mayor importancia de carácter socioeconómico, ya que su rendimiento y calidad de madera es de las mejores de entre todas las especies comerciales del país, además de ser recomendable como especie para reforestación (Eguiluz, 1978; Agrosoft, 2000) debido a las características que presenta como lo es su moderada resistencia a las sequías (Martínez, 1948; Agrosoft, 2000). Esta especie se distribuye naturalmente en la Sierra Madre Oriental y en las Serranías Meridionales de la provincia Eje Neovolcánico (Rzedowski, 2006), por lo que tiene gran potencial de desarrollo en el estado de México.

Abies religiosa fue elegida por ser el único abeto que se distribuye en el centro del país y porque se encuentra en mayor riesgo, pues los ecosistemas que forma son más frágiles ecológicamente (Eguiarte, 1997, Del Castillo, 2010). Su distribución espacial es reducida, lo que la hace muy vulnerable a alteración por causa de actividades económicas (Challenger, 1998). Se encuentra en segundo lugar de importancia como género en la entidad, en cuanto a su aprovechamiento económico (INEGI, 1997, 1999, 2001, 2006 y 2009).

Un aspecto a considerar con respecto a la elección de *Quercus rugosa*, es que el género *Quercus* es el tercero en importancia con respecto a su aprovechamiento económico, el cual ha presentado un incremento significativo en los últimos años según estadísticas de INEGI (1997, 1999, 2001, 2006 y 2009). Cabe mencionar que los encinares mexicanos son en general bastante explotados a escala local, pero muy poco a nivel industrial (Rzedowski, 2006).

Quercus rugosa fue considerada también porque presenta condiciones ambientales diferentes, con respecto a *Pinus patula* y *Abies religiosa*, lo que hace que los requerimientos agroecológicos como precipitación, textura y profundidad del suelo y altitud, determinen zonas de ubicación diferentes para esta especie en relación a las otras dos. Es importante decir, además, que los encinos se han

sugerido como especies clave en la rehabilitación y restauración de bosques (Batis, 1999).

3.4.2. Definición de variables para la evaluación de especies forestales

Las variables utilizadas se seleccionaron con base en la importancia de éstas como limitantes para el desarrollo de las especies estudiadas; otro factor a considerar en esta selección fue la disponibilidad de cartografía en formato digital para el procesamiento de cada variable, ya que sólo se trabajó con las variables con las que se contaba con este tipo de información. Se seleccionaron los requerimientos ambientales precipitación total anual, temperatura media anual, pH, textura y profundidad del suelo y altitud.

Para identificar los requerimientos agroecológicos de las especies forestales se consultaron las fuentes de información: Eguiluz (1978), FAO (2000) y principalmente el Sistema de Información de Reforestación (Conabio-Pronare, 2006). En la **tabla 5** se concentra la información referente a los requerimientos agroecológicos para las tres especies consideradas en la investigación.

Tabla 5. Especies forestales consideradas y sus requerimientos agroecológicos

Variable / Especie	<i>P. patula</i> Schl.	<i>A. religiosa</i> Kunth Schltdl. et Cham.	<i>Q. rugosa</i> Neé
Precipitación total anual (mm)	600 - 2500	1000 - 1400	1230 - 1619
Temperatura media anual °C	10 - 19	7 - 15	9.3 - 22.6
pH del suelo (escala)	3.8 - 6.6	5 - 7	5.4 - 6.4
Textura del suelo (clase)	Fina - media	Fina - gruesa	Fina - gruesa
Profundidad del suelo (cm)	50 - 119	22 - 119	22 - 119
Altitud (msnm)	1500 - 3100	2800 - 3500	1800 - 2800

3.4.3. Cartografía digital de las variables empleadas

De acuerdo con la definición de los requerimientos agroecológicos de cada especie forestal se procedió a obtener las coberturas digitales de cada variable.

Se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) ARC GIS versión 9.3 para realizar los procesos de preparación de las variables. Con base en cartografía digital de INEGI se procesaron y editaron las variables: pH y textura del suelo.

La cartografía digital del estado de México de precipitación total anual y temperatura promedio anual, fue producida en el INIFAP. Para obtener las coberturas de temperatura y precipitación, se trabajó con una base de datos de temperatura y precipitación mensual de 386 estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y en los límites del estado de México. Se consiguió ajustar y completar la información de 60% de estas estaciones con programas estadísticos y se obtuvo con esto una base actualizada al 2003. La cobertura de temperatura tiene un error estimado entre 0.5 y 0.8 °C; la de la precipitación mensual de entre 27 y 33 mm (Díaz, 2007).

El pH y la textura del suelo, se generaron de la interpolación de los pozos pedológicos de INEGI de cartas edafológicas escala 1:50,000 y con una base de datos del INIFAP para las áreas agrícolas, con una cuadrícula a cada 1,000 m. Los perfiles se interpolaron con el método de Inverso de la distancia al cuadrado (IDW) con 10 puntos vecinos más cercanos.

La profundidad del suelo se obtuvo a partir de pozos edafológicos de INEGI (1976) escalas 1:50,000 y 1:250,000. Los datos fueron interpolados con el método inverso de la distancia al cuadrado.

La altitud se obtuvo del procesamiento del modelo digital de elevación obtenida de la página electrónica <http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb/> con una resolución de 30 m.

Todas las coberturas digitales se trabajaron en formato raster con una proyección UTM y datum WGS84.

3.4.4. Áreas de restricción y supuestos

El trabajo de evaluación de la aptitud del terreno se realizó para todo el estado de México; sin embargo, se establecieron para este estudio áreas de restricción y supuestos para obtener los resultados de la aptitud actual de las especies forestales y bajo escenarios de cambio climático.

Las áreas de restricción contempladas son zonas que no se aplican para uso forestal, puesto que son áreas no adecuadas para el desarrollo de las especies forestales seleccionadas. Las áreas de restricción para este estudio fueron las áreas urbanas, los cuerpos de agua y, los suelos de tipo Litosol (no mayores a 10 cm de profundidad) con lecho rocoso. Por consiguiente, estas áreas no fueron evaluadas.

Las coberturas digitales de zonas urbanas y cuerpos de agua se obtuvieron de la Serie III (INEGI, 2005) escala 1:250,000. La de litosoles se obtuvo de la cobertura digital edafológica (INIFAP y Conabio, 1995), escala 1: 250,000. Estas coberturas, las cuales fueron agrupadas en un solo tema se muestran en la **figura 8**.

Los supuestos aplicados en el modelaje de la evaluación de la aptitud del terreno fueron que el crecimiento de la población y de las zonas urbanas y los usos del suelo que se encuentran en la entidad federativa, se mantienen igual, es decir, que no habría cambios de usos del suelo en los periodos considerados en esta evaluación. Adicionalmente, las tierras agrícolas se consideraron como tierras evaluables.

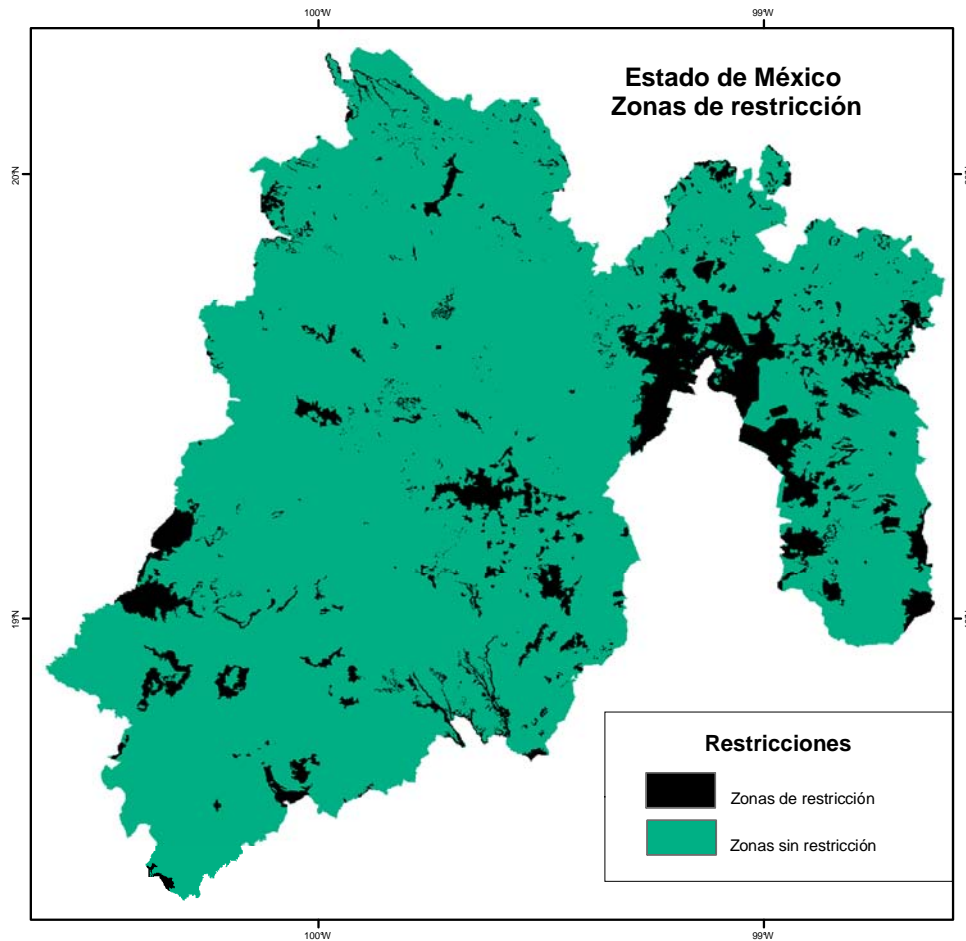


Figura 8. Zonas de restricción consideradas para la evaluación de aptitud. Elaborado con base en la Serie III. Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación del estado de México. INEGI, 2005 y el Mapa edafológico. Escala 1:250,000 y 1:1,000,000. México. INIFAP y Conabio (1995).

3.4.5. Evaluación de la aptitud actual del terreno

Para llevar a cabo la evaluación de la aptitud del terreno, se reclasificaron los valores de las coberturas digitales de cada variable de acuerdo con los requerimientos agroecológicos de cada especie. Este proceso se realizó con el módulo *reclass* del software Arc Gis versión 9.3. La reclasificación generó dos categorías: Apto (1) y No Apto (0). La cobertura para las áreas de restricción se reclasificó en valores de 0 (No apto) y No dato.

Después de la reclasificación de las variables temperatura media anual, precipitación total anual, pH, textura y profundidad del suelo, altitud y restricciones, se procedió a utilizar álgebra booleana con estas variables, para obtener la cobertura de aptitud actual del terreno. Este procedimiento permitió obtener las áreas aptas mediante la conversión a valor 1 de las superficies que comparten la misma distribución de píxeles. En las superficies no aptas, es decir, con valor de 0, los píxeles no comparten la misma distribución. La **figura 9** muestra un diagrama del procedimiento instrumentado para el caso de *Pinus patula*.

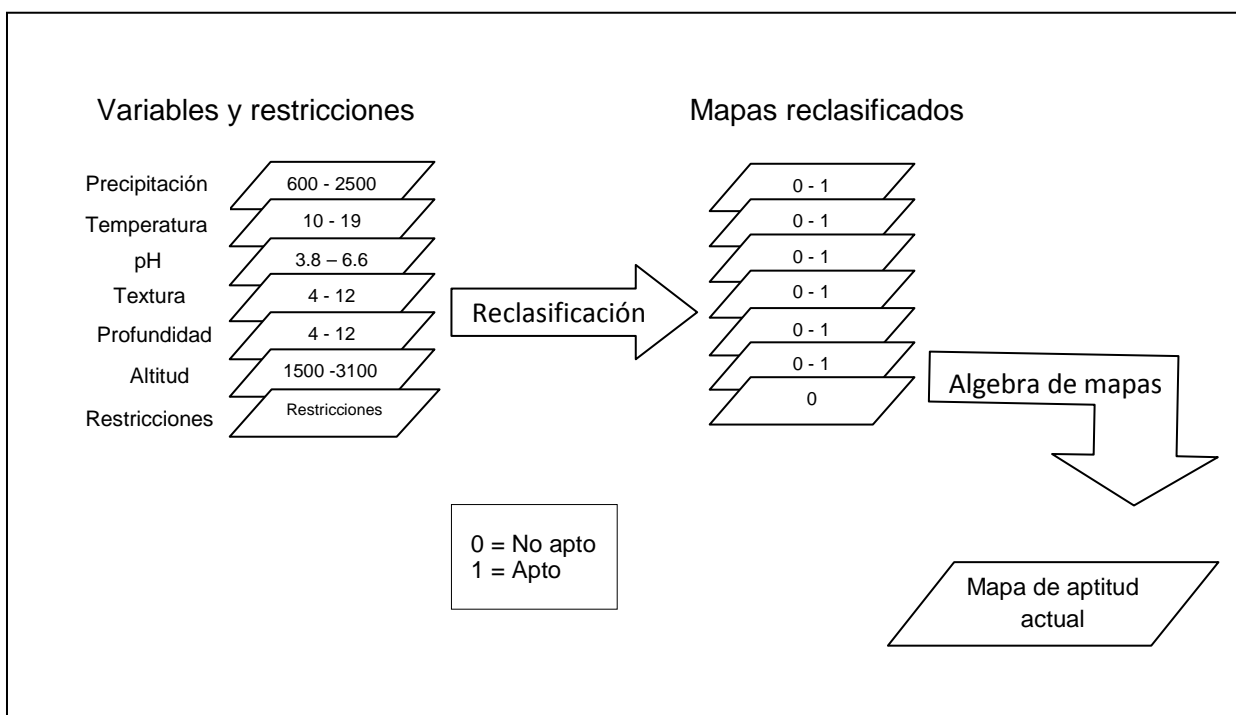


Figura 9. Álgebra de mapas para *Pinus patula*

3.4.6. Evaluación de la aptitud potencial del terreno con escenarios de cambio climático

3.4.7. Aplicación de los escenarios de cambio climático

La construcción de los escenarios se realizó para las variables precipitación total anual y temperatura media anual, con los Modelos de Circulación General de la Atmósfera GFDL 2.0 y HADGEM, creados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México. La elección de los modelos tomó en consideración que a nivel regional, y por el nivel de resolución espacial que presentan, son representativos para el país (Gay *et al.*, 2008).

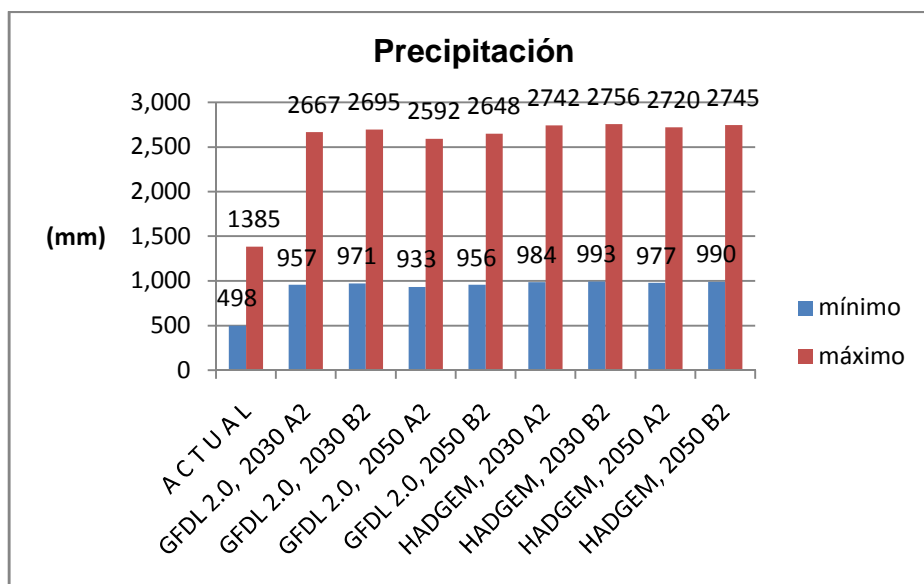
Se utilizaron los escenarios A2 y B2 para los años 2030 y 2050 con una malla de 10 por 10 km (Conde *et al.*, 2008). La base de datos de los escenarios A2 y B2 de temperatura y precipitación de los dos modelos se obtuvieron de la página: http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74>. Los escenarios de temperatura y precipitación se interpolaron con un radio de ocho puntos vecinos, por el método de *Inverse Distance Weighted* del *Spatial Analysis* en el SIG Arc Map 9.3, el cual para la variable temperatura ofrece resultados más cercanos a la realidad.

Las unidades de los escenarios de precipitación procesados fueron convertidas a milímetros. Para ello se dividió entre 100 los porcentajes y luego se multiplicaron por los de la cobertura base. Con el fin de acercar los valores de temperatura lo más posible a la realidad, se combinó el modelo digital de elevaciones (MDE) utilizado en la evaluación de aptitud; se corrigió la altura al sumar el MDE con las coberturas de temperatura del escenario base del 2003. El resultado de esta operación se sumó a la cobertura base de cada variable en función de la anomalía o error marginal, es decir, al aumento o reducción de valor en precipitación o temperatura proyectado en los escenarios de cambio climático. Para la cobertura

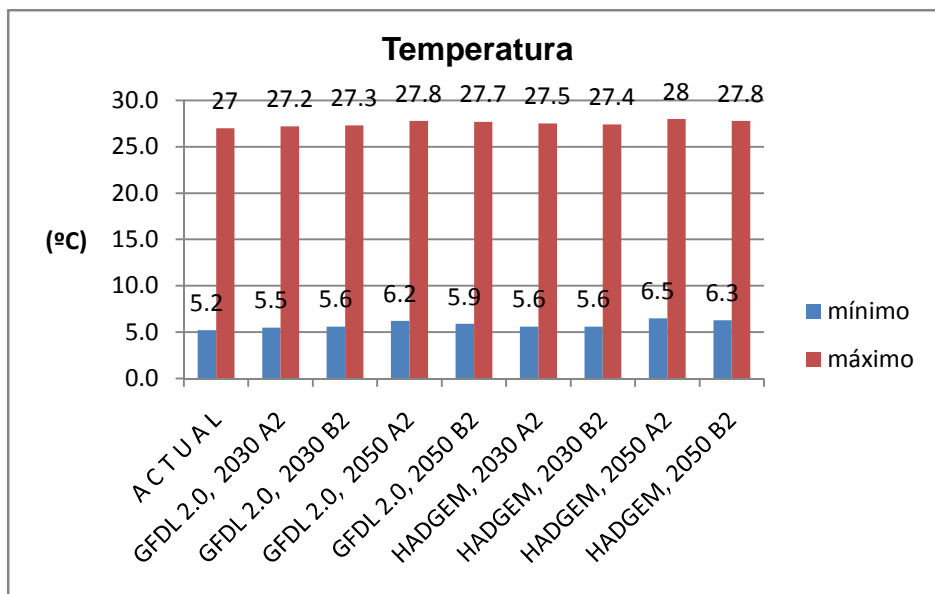
de temperatura los valores fueron en grados centígrados, los cuales se sumaron a la cobertura base.

Se generaron coberturas mensuales para cada periodo (año 2030 y año 2050), escenario y modelo de temperatura y precipitación, empleando las funciones de la calculadora para raster en ArcMap 9.3. Una vez obtenidas, las doce coberturas de precipitación total mensual para el área estudiada se sumaron, con el fin de obtener la cobertura de precipitación total anual. Para la temperatura, los doce valores mensuales de las coberturas se promediaron, para obtener la cobertura de temperatura anual media. En total se obtuvieron para cada modelo cuatro escenarios de precipitación total anual y cuatro de temperatura media anual. De éstas, cuatro coberturas son para el año 2030 y cuatro para el 2050. En total, fueron ocho escenarios (cuatro A2 y cuatro B2) por cada modelo.

Los resultados en el procesamiento de los escenarios de cambio climático presentaron aumentos en precipitación y temperatura con respecto a los valores actuales. Las **gráficas 1 y 2** muestran los valores de los escenarios con respecto a los actuales, para precipitación y temperatura respectivamente.



Gráfica 1. Precipitación con escenarios de cambio climático con respecto a la actual. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.



Gráfica 2. Temperatura con escenarios de cambio climático con respecto a la actual. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

3.4.8. Evaluación de la aptitud potencial del terreno con escenarios de cambio climático proyectados para los años 2030 y 2050

Para la evaluación de la aptitud potencial del terreno, las coberturas de los escenarios generadas se reclasificaron con los mismos valores de requerimientos agroecológicos que se emplearon para la evaluación de la aptitud actual del terreno. Estos procesos se realizaron empleando el módulo *reclass* del *spatial analyst* del programa modelador ArcMap 9.3.

El proceso de evaluación de la aptitud potencial se realizó con la misma operación utilizada para la evaluación actual del terreno (empleando la calculadora para raster); sólo se sustituyeron en la multiplicación, las coberturas de precipitación y de temperatura actuales, por las generadas por los modelos de Circulación General de la Atmósfera para cada escenario. De esta manera, se obtuvieron los mapas de aptitud potencial del terreno con base en escenarios de cambio climático para cada especie forestal.

3.5. Resultados y discusión

Se obtuvo un mapa de aptitud actual para cada especie estudiada. Se obtuvieron por cada modelo utilizado, dos mapas de aptitud potencial para los escenarios A2, y dos para los escenarios B2. En total se obtuvieron ocho mapas de aptitud potencial para los escenarios de cambio climático por especie. Estos mapas reflejan las áreas que cumplen con los requerimientos agroecológicos que demandan las especies para su desarrollo. Los resultados obtenidos con el método aplicado no representan las áreas en las que las especies se encuentran distribuidas actualmente, sino las áreas en donde, de acuerdo con sus requerimientos ambientales, estas especies tienen el potencial para desarrollarse.

3.5.1. *Pinus patula*

A) Aptitud actual

La cobertura de aptitud actual del terreno para *Pinus patula* (**figura 10**), muestra una distribución en gran parte de la entidad. La mayor parte de la superficie cubierta por esta especie se encuentra en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, en la parte occidental del estado, principalmente de la zona centro hacia el norte y noroeste; la parte este del estado alberga áreas de menor extensión. Una menor porción se localiza en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur. Al comparar estas superficies aptas, con la cartografía de tipos de clima y suelo, se observó que se encuentran distribuidas dentro de zonas que corresponden principalmente al clima templado subhúmedo; se asientan sobre tipos de suelo diversos. El área apta para *Pinus patula* abarca el 38.3% del territorio estatal, que equivale a 848,441 ha.

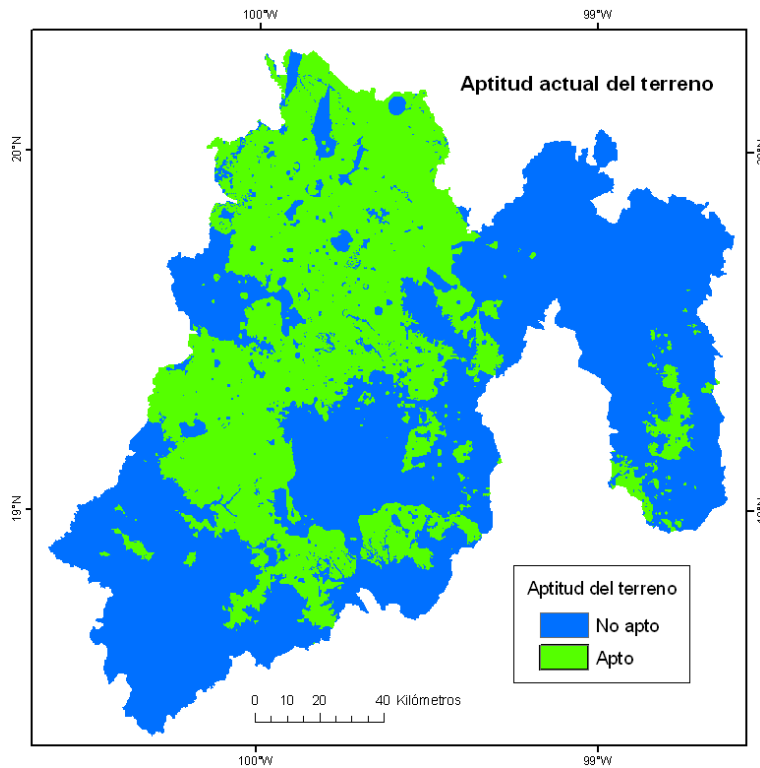


Figura 10. Aptitud actual del terreno para *Pinus patula*. Elaborado con base en cartografía digital de INEGI.

No fue posible elaborar un mapa de aptitud del terreno con los sitios de colectas incluidos para *Pinus patula*, como se había pensado hacer para las tres especies estudiadas, debido a que no se encuentran registros en las bases de datos de Conabio.

b) Aptitud bajo escenarios de cambio climático

Las coberturas de aptitud obtenidas para los escenarios de cambio climático guardan mucha similitud con el mapa de aptitud actual en su distribución, tipos de clima y suelos que presentan.

En el caso de *Pinus patula*, los mapas obtenidos al emplear escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura, presentaron una disminución de las

superficies aptas en todos los casos con respecto al mapa de aptitud actual. Los resultados para los valores de las superficies con aptitud obtenidos con escenarios de cambio climático se presentan en la **tabla 6**.

Tabla 6. Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para *Pinus patula*

	Aptitud actual	Escenario de cambio de climático							
		GFDL 2.0				HADGEM			
		2030		2050		2030		2050	
		A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Superficie apta (ha)	848,441	837,189	833,447	800,530	809,275	813,950	809,665	778,606	782,096
Porcentaje (%) [*]	38.3	37.9	37.7	36.2	36.6	36.8	36.6	35.2	35.4
Reducción (ha) ^{**}	-	11,252	14,994	47,911	39,166	34,491	38,776	69,835	66,345
Reducción (%) ^{**}	-	1.33	1.77	5.65	4.62	4.07	4.57	8.23	7.82
*Con respecto a la superficie estatal. **Con respecto a la superficie apta actual.									

Con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0, año 2030, se obtuvo una superficie de aptitud para *Pinus patula* de 837,189 ha, equivalente a 37.9% de la superficie estatal. El escenario A2 tuvo una mayor extensión territorial apta respecto al escenario B2, con una diferencia de 3,742 ha; redujo su superficie en un 1.33% con respecto a la actual. Para el año 2050 con el mismo modelo, el escenario B2 registró una superficie mayor de aptitud que asciende a 809,275 ha (36.6% de la superficie estatal), con una reducción de 4.62% del área apta actual, en comparación con el A2, el cual tiene un área de 800,530 ha que representan 36.2% de la superficie estatal. Se tuvo una diferencia de 8,745 ha entre estos dos últimos escenarios.

En cuanto al modelo HADGEM, año 2030, el escenario A2 tuvo una superficie apta de 813,950 ha, misma que cubre 36.8% de la superficie estatal. Con el escenario B2 se obtuvieron 4,285 ha menos que con el A2, para el mismo modelo

y año, lo que significa una diferencia en porcentaje de 0.2% de la superficie estatal. Para el 2050, el escenario B2 contó con 782,096 ha, la mayor superficie apta para el desarrollo de ésta conífera, al compararla con el área del escenario A2 del mismo modelo y año, el cual presentó una superficie apta de 778,606 ha, las cuales se traducen en una reducción de 3,490 ha aptas más que las que pierde el escenario B2 y, que en cuanto a la superficie apta de la entidad, representan 0.2% menos que con el escenario B2.

Al hacer comparaciones entre los resultados para los años 2030 y 2050, se presenta lo siguiente. Respecto al año 2030, se obtuvo la reducción mayor con el escenario B2, del modelo HADGEM, que equivale a 4.57% de la superficie apta actual, en contraste con una reducción menor en superficie, obtenida con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 que equivale a 1.33%. Para el año 2050, el escenario que presentó la mayor reducción en superficie apta es el A2 del modelo HADGEM, con el 8.23%. El escenario que proyectó una reducción menor es el B2, del modelo GFDL 2.0, equivalente a 4.62% de la superficie apta actual.

En forma particular, los escenarios A2, año 2030 del modelo GFDL 2.0 y A2, año 2050 del modelo HADGEM muestran los valores extremos en cuanto a superficie apta. Las **figuras 11 y 12** muestran los mapas con la distribución para estos escenarios

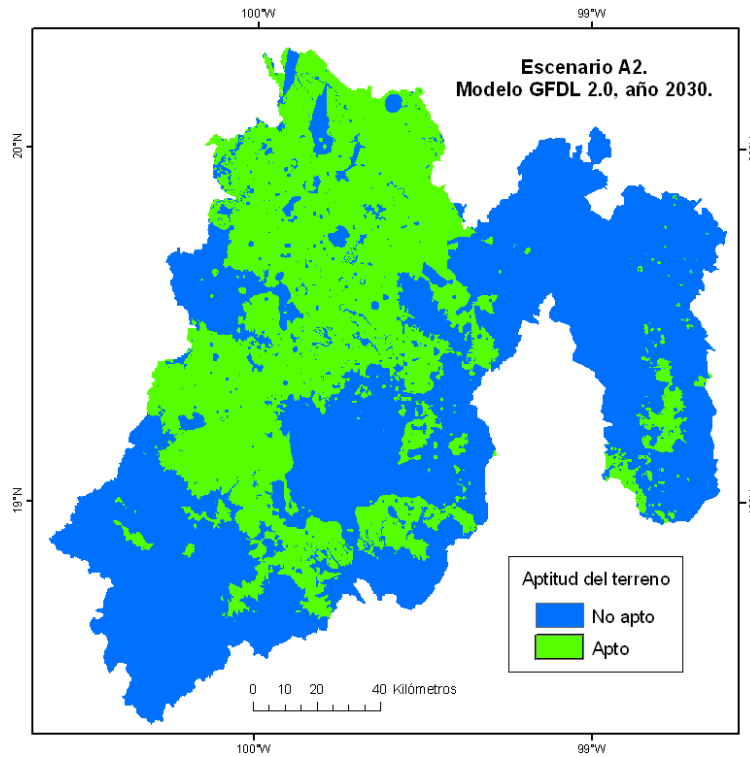


Figura 11. Distribución de *Pinus patula* con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2030. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y Precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

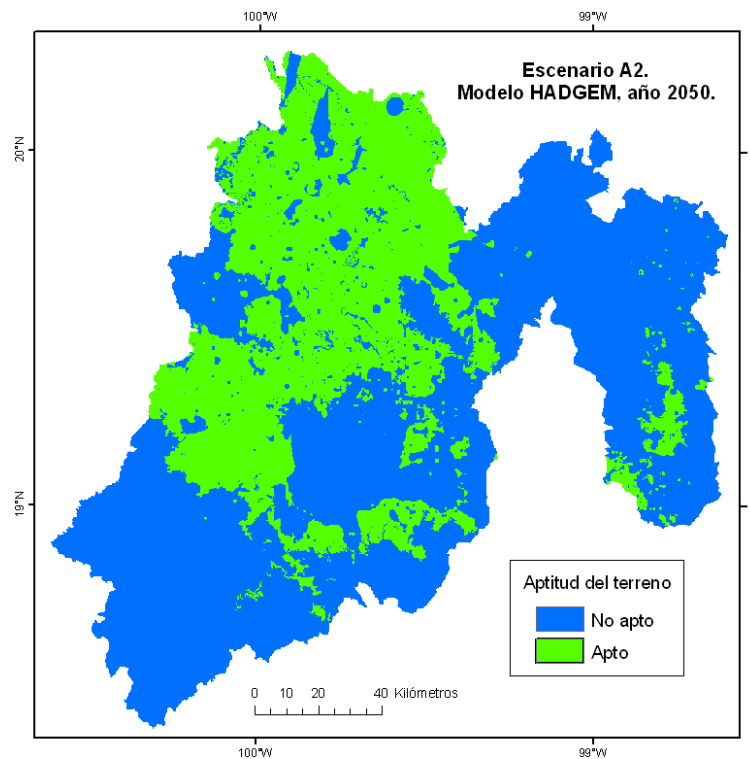
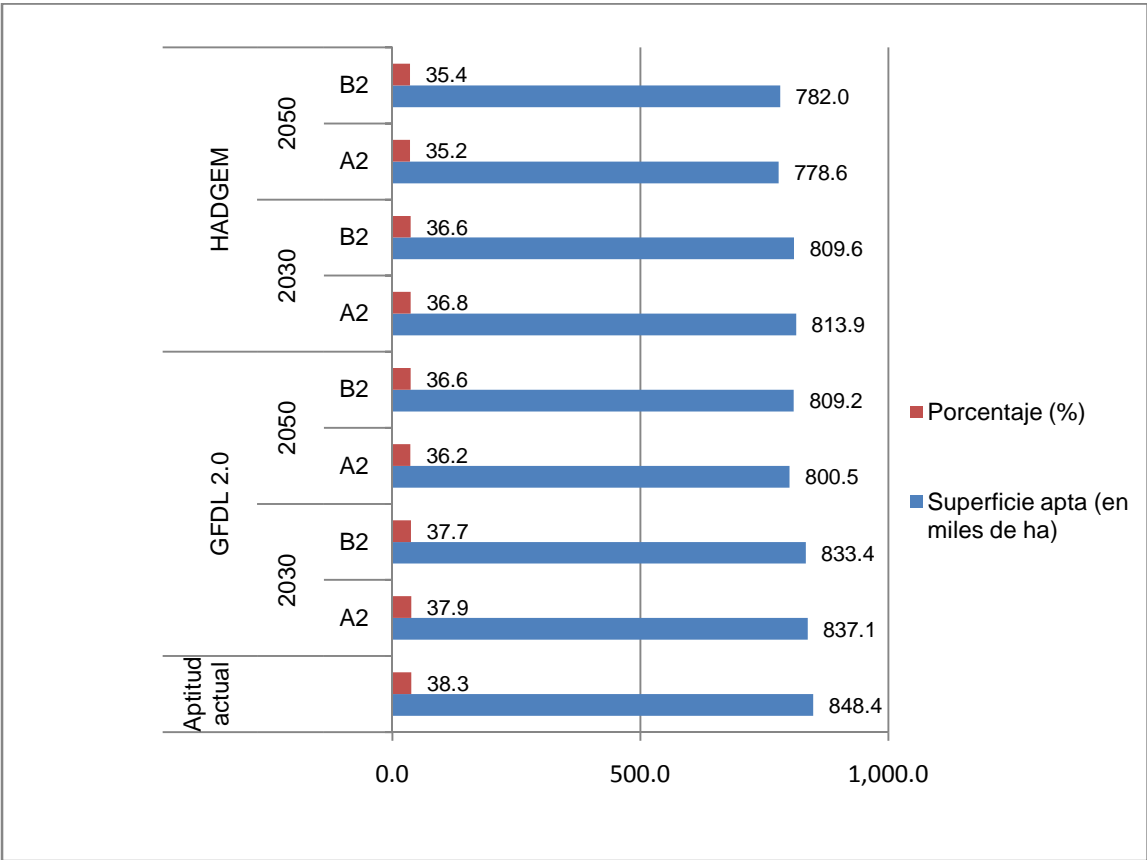


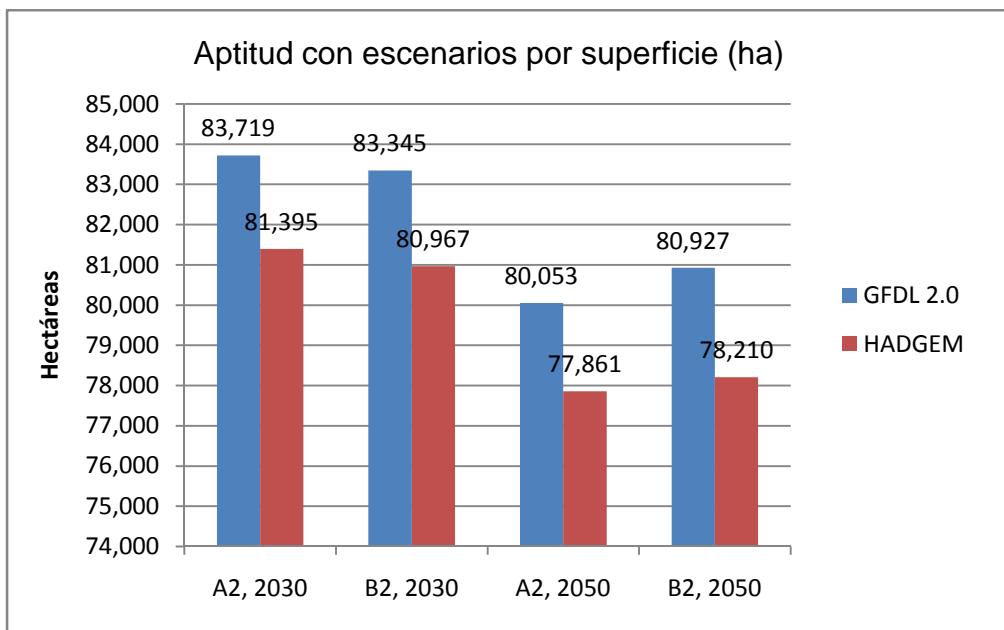
Figura 12. Distribución de *Pinus patula* con el escenario A2 del modelo HADGEM para el año 2050. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

En forma general, los valores de las superficies con aptitud para el desarrollo del Pino Patula bajo escenarios de cambio climático se presentan en la **gráfica 3**, los porcentajes de áreas aptas oscilaron entre 35 y 38%. Para el año 2030 los valores se encontraron entre 36.6% (escenario B2 del modelo HADGEM) y 37.9% (escenario A2 del modelo GFDL 2.0), con una diferencia de 27,524 ha. Para el año 2050, los valores se encontraron entre 35.2% (escenario A2 del modelo HADGEM) y 36.6% (escenario B2 del modelo GDFL 2.0), lo que equivale a una diferencia de 30,669 ha.



Gráfica 3. Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para *Pinus patula*, con respecto a la total del estado

Los resultados por modelo para *Pinus patula* permitieron observar que los cambios en las superficies aptas para el modelo HADGEM, señalan mayor disminución de estas superficies en todos sus escenarios con respecto al GFDL 2.0. Este comportamiento se aprecia en la **gráfica 4**.



Gráfica 4. Aptitud con escenarios de cambio climático por superficie para *Pinus patula*

En la gráfica 4, se observa que los escenarios A2 y B2 reflejan las alternativas que se tienen respecto a cómo se podría comportar el clima futuro, de acuerdo con las condiciones de desarrollo económico a nivel regional, bajo las que se emitirán GEI a la atmósfera. Los escenarios A2, que presentaron valores de aptitud del terreno mayores que los de los B2, muestran un mundo muy heterogéneo con un aumento continuo en la población global y un crecimiento económico regional más lento, el cual está también más fragmentado. En los escenarios B2 se da un énfasis en soluciones locales a la sustentabilidad social, ambiental y económica, con un aumento continuo de la población y, un desarrollo económico intermedio (IPCC, 2000).

En lo concerniente a cómo se perciben o reflejan los resultados dentro del aspecto económico para *Pinus patula*, sólo se puede decir que debido a que no se dispone de los datos correspondientes al volumen, el valor de la producción y la distribución actual para *Pinus patula*, es decir, sólo se tiene esta información para el género *Pinus*, no fue posible hacer una comparación directa entre los valores de producción entre la especie y el género.

No obstante, se sabe que el pino sufrió una disminución progresiva en volumen de la producción maderable; en el año 2000 se produjo un volumen de 348,170 m³r, mientras que en el año 2008 se obtuvo un volumen de 56,833 m³r; es decir, en este periodo hubo una disminución de 291,337 m³r (INEGI 2001, 2006 y 2009).

Se puede deducir que con la pérdida de 69,835 ha (8.23% de la superficie apta actual para *Pinus patula*) que se proyecta para el escenario A2, año 2050 del modelo HADGEM, que arrojó los resultados más negativos para la especie, provocaría que la producción maderable en volumen descienda, así como también se reducirían los ingresos para las diferentes unidades económicas relacionadas con el aprovechamiento forestal.

3.5.2 *Abies religiosa*

A) Aptitud actual

En el mapa de aptitud actual del terreno para *Abies religiosa* (**Figura 13**), se observa que la distribución de la especie se presenta casi en su totalidad dentro de la subprovincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac, perteneciente a la provincia Eje Neovolcánico. Muestra áreas aptas cercanas al centro de la entidad, una de las cuales se extiende a lo largo de una franja colindante con la parte oeste del Distrito Federal, de unos 75 kilómetros de longitud; otra zona apta se ubica al oeste y ligeramente al sur de la zona mencionada. Otra zona apta, de dimensiones menores, se ubica al este de la entidad.

Al comparar estas superficies aptas, con la cartografía correspondiente al medio físico, se observó que éstas se encuentran distribuidas dentro de zonas que corresponden principalmente al clima templado, semifrío subhúmedo, y en menor proporción al clima templado subhúmedo; se ven distribuidas sobre suelos andosoles en su mayor parte; al este del estado se presentan en suelos regosoles.

La superficie apta para *Abies religiosa* abarca aproximadamente 7.55% de la superficie de la entidad, equivalente a 167,152 ha.

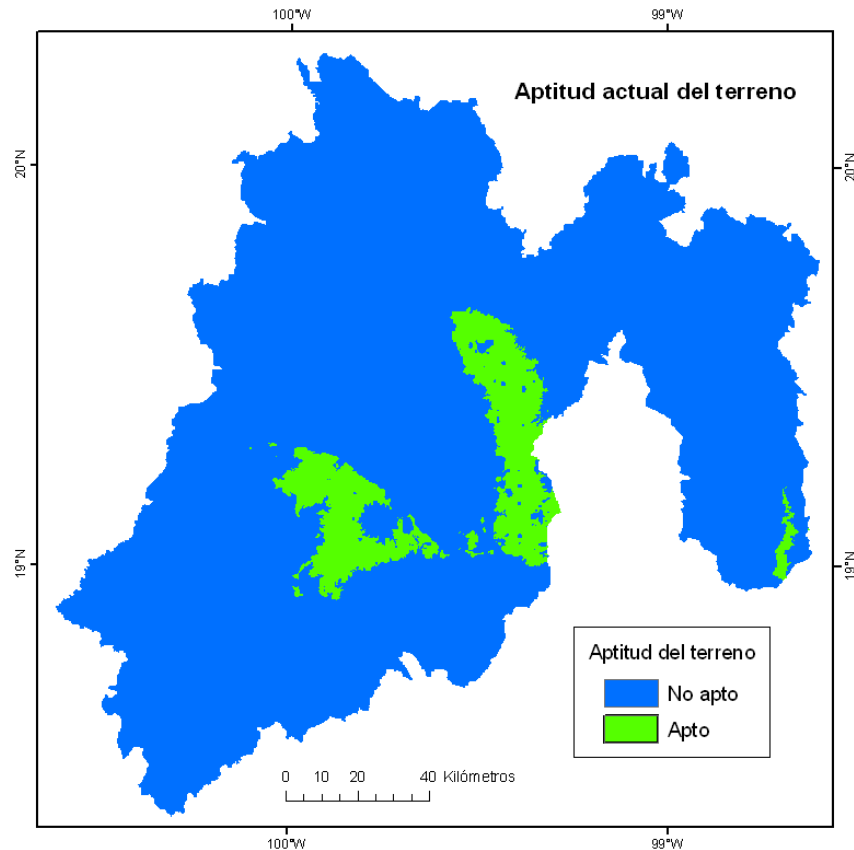


Figura 13. Aptitud actual del terreno para *Abies religiosa*. Elaborado con base en cartografía digital de INEGI.

Al comparar las superficies de aptitud actual que se obtuvieron a partir de las variables empleadas, con los sitios de colectas para *Abies religiosa*, se observa que coinciden sobre todo en el centro del estado. En la parte este, se observa que cerca de la mitad de los sitios de colectas no coinciden con las superficies consideradas aptas del mapa de aptitud actual. Esto se debe a que la combinación de los valores tomados de las fuentes de información empleadas, al momento de hacer las operaciones de álgebra de mapas, restringen las superficies aptas a las zonas en donde todas las variables tienen presencia a nivel de píxel. La **figura 14** muestra la distribución de estas superficies aptas y los sitios de colectas en el estado.

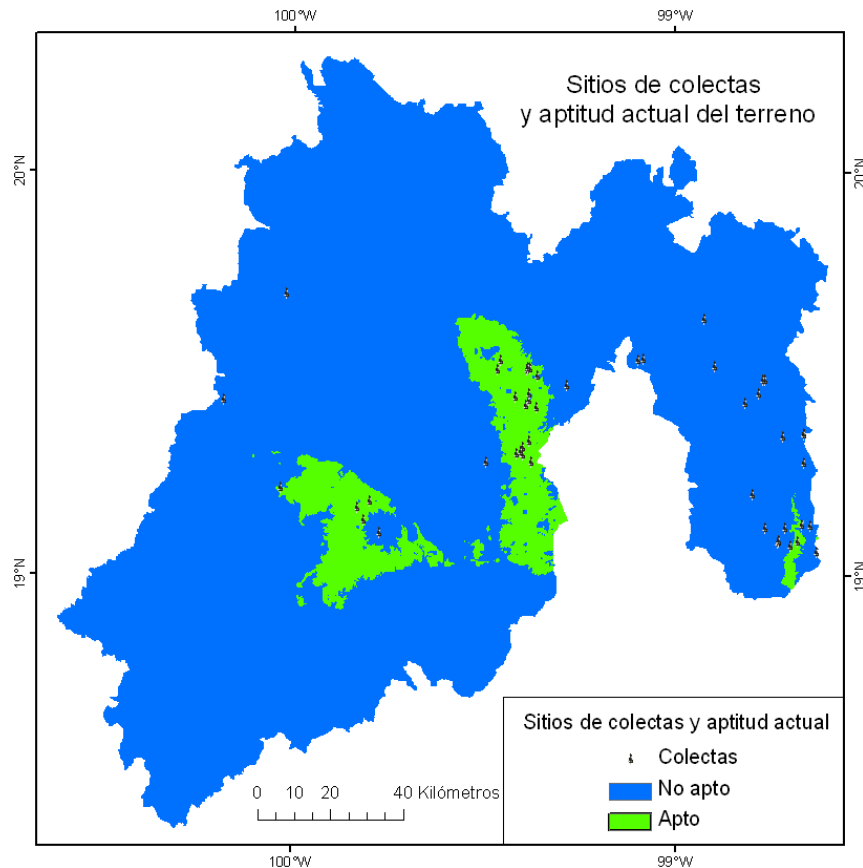


Figura 14. Sitios de colectas y aptitud actual del terreno para *Abies religiosa*. Elaborado con base en cartografía digital de INEGI y los sitios de colectas registrados en el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de Conabio.

B) Aptitud bajo escenarios de cambio climático

La localización de *Abies religiosa* cambia al aplicar los escenarios de cambio climático. Las zonas aptas se ubican principalmente al noreste de la entidad, dentro de la subprovincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac, que pertenece a la provincia Eje Neovolcánico; una pequeña zona se encuentra en el extremo norte del estado.

Al comparar estas superficies aptas con la cartografía correspondiente al medio físico, se observó que se encuentran distribuidas dentro de zonas que corresponden principalmente al clima templado subhúmedo; se ven distribuidas sobre suelos feozem y andosoles.

Las áreas aptas para *Abies religiosa* con los escenarios A2 y B2 de los dos modelos utilizados, mostraron una disminución de su superficie con respecto a la superficie apta actual. En este caso, las áreas aptas actuales cercanas al centro de la entidad ya no son aptas. La nueva ubicación de esta especie se sitúa en el este del estado, ligeramente al norte. Estas áreas aptas varían en extensión de acuerdo con cada escenario. En la **tabla 7** se presentan los valores de superficie de aptitud actual y para los escenarios de los dos modelos.

Tabla 7. Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para *Abies religiosa*

	Aptitud actual	Escenario de cambio de climático							
		GFDL 2.0				HADGEM			
		2030		2050		2030		2050	
		A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Superficie apta (ha)	167,152	1,974	1,384	3,377	2,034	952	646	1,375	762
Porcentaje (%)*	7.55	0.09	0.06	0.15	0.09	0.04	0.03	0.06	0.03
Reducción (ha)**	-	165,178	165,768	163,775	165,118	166,200	166,506	165,777	166,390
Reducción (%)**	-	98.82	99.17	97.98	98.78	99.43	99.61	99.18	99.54
*Con respecto a la superficie estatal.									
**Con respecto a la superficie apta actual.									

Para el escenario A2 del modelo GFDL 2.0, año 2030, se obtuvo una superficie de aptitud para *Abies religiosa* de 1,974 ha, equivalente a 0.09% de la superficie estatal. Este escenario tiene una mayor extensión territorial apta respecto al escenario B2, con una diferencia de 590 ha; reduce su superficie 98.82% con respecto a la superficie apta actual. Para el año 2050 con el mismo modelo, el escenario A2 registró la mayor superficie de aptitud: 3,377 ha (0.15% del área estatal), en comparación con el B2, el cual tuvo un área de 2,034 ha que representan 0.09% de la superficie estatal, así como 98.78% de reducción de

superficie con respecto al área apta actual. Hay una diferencia de 1,343 ha entre estos dos últimos escenarios,

Con el modelo HADGEM, año 2030, el escenario A2 tuvo una superficie apta de 952 ha, misma que cubre 0.04% de la superficie estatal. Con el escenario B2 se obtuvieron 306 ha menos de superficie apta que con el A2, lo que significa una diferencia en porcentaje de 0.01% de presencia dentro del estado. Para el 2050 con el mismo modelo, el escenario B2 contó con 762 ha, 613 ha menos que con el escenario A2, el cual tiene una superficie apta de 1,375 ha; es decir, 0.03% más de superficie que el escenario B2, con respecto a la superficie estatal.

La comparación entre los resultados para los años 2030 y 2050, presentó lo siguiente: respecto al año 2030, se obtuvo la mayor reducción con el escenario B2, del modelo HADGEM, que equivale a 99.61% de la superficie apta actual, en contraste con una reducción menor en superficie, obtenida con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0, equivale a 98.82%. Para el año 2050, el escenario que presentó la mayor reducción en superficie apta es el B2 del modelo HADGEM, con 99.54%; el escenario que proyecta una reducción menor es el A2, del modelo GFDL 2.0, equivalente a 97.98% de la superficie apta actual.

En forma particular, los escenarios A2, año 2050 del modelo GFDL 2.0 y B2, año 2030 del modelo HADGEM muestran los valores extremos en cuanto a superficie apta. El primer escenario tuvo un área apta de 3,377 ha, que equivalen al 0.15% de la superficie total del estado; el segundo tuvo un área apta de 646 ha, que equivalen a 0.03%; representa la quinta parte de la superficie con aptitud que tiene el primer escenario. Las **figuras 15 y 16** muestran los mapas con la distribución para estos escenarios.

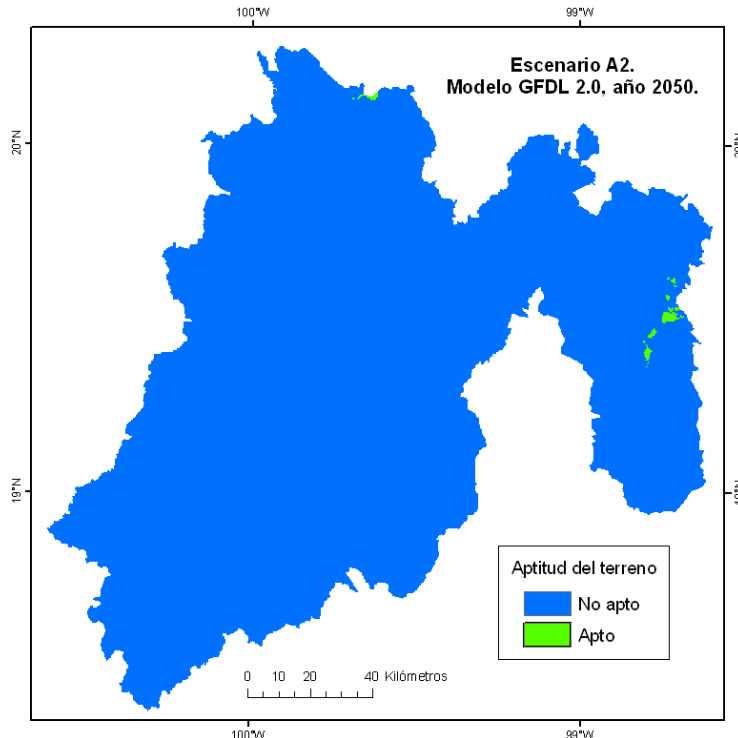


Figura 15. Distribución de *Abies religiosa* con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2050. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

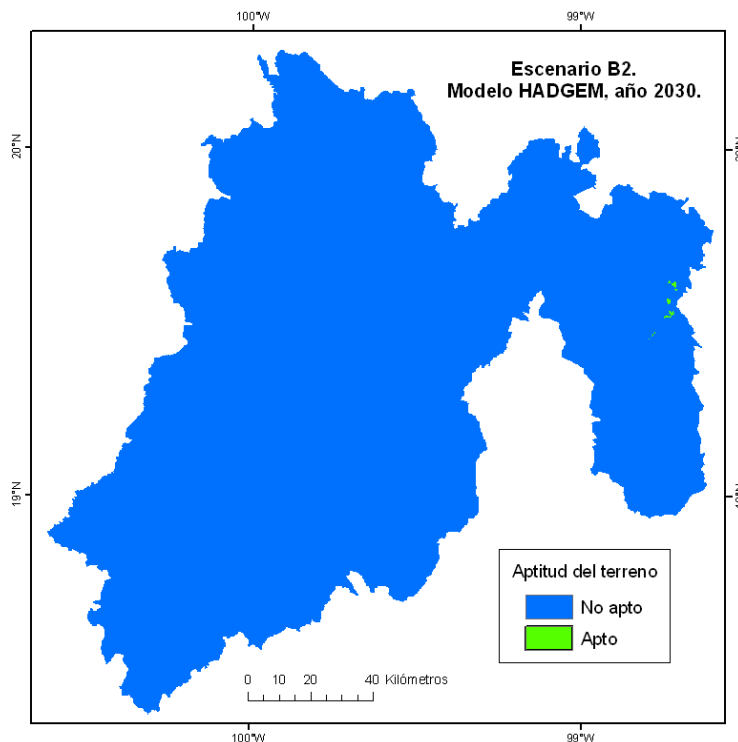
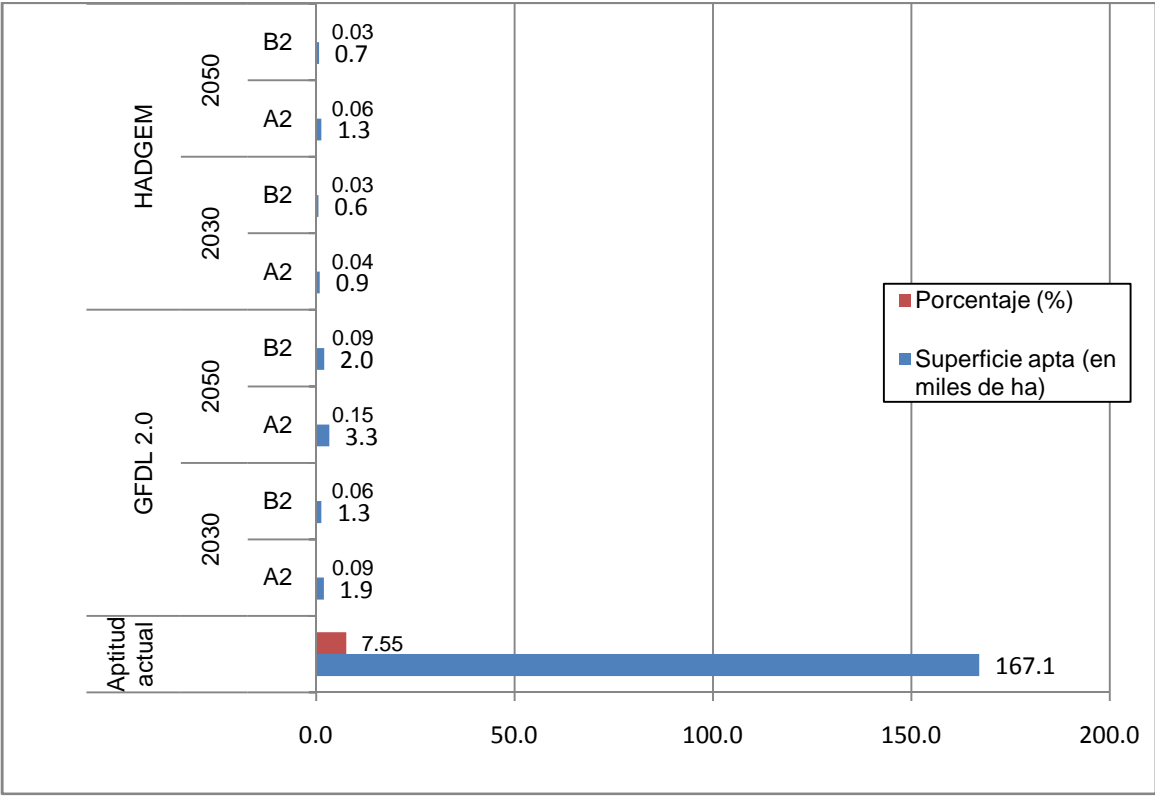


Figura 16. Distribución de *Abies religiosa* con el escenario B2 del modelo HADGEM para el año 2030. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

La superficie con aptitud para el desarrollo del oyamel bajo escenarios de cambio climático se presenta en forma general en la **gráfica 5**. Los porcentajes de áreas aptas con relación a la superficie estatal oscilaron entre 0.03 y 0.15%. Para el año 2030 los valores estuvieron entre 0.03% (escenario B2 del modelo HADGEM) y 0.09% (escenario A2 del modelo GFDL 2.0), con una diferencia de 1,328 ha. Para el año 2050, los valores estuvieron entre 0.03% (escenario B2 del modelo HADGEM) y 0.15% (escenario A2 del modelo GDFL 2.0), lo que equivale una diferencia de 2,615 ha.

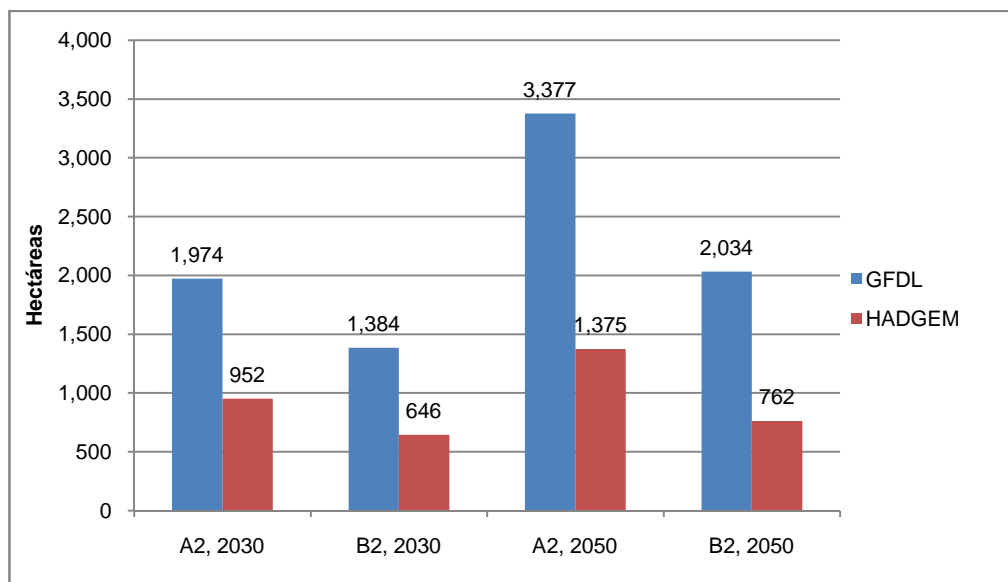


Gráfica 5. Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para *Abies religiosa* con respecto a la total del estado

Con *Abies religiosa* se aprecia, de la misma manera, que el modelo HADGEM con sus escenarios para los años 2030 y 2050 sufre de mayor reducción en superficies aptas con respecto al modelo GFDL 2.0 en los mismos años y escenarios. En este caso, los escenarios A2 en ambos casos arrojaron resultados más positivos que los de los escenarios B2, de acuerdo con lo que reportan otras investigaciones,

como la de Arriaga y Gómez (2004) y Gómez *et al.* (2009), como se verá más adelante.

La **gráfica 6** presenta los resultados para los dos modelos, con los cuales se permite apreciar que los escenarios A2 y B2 reflejaron las alternativas que se tienen respecto a cómo se podría comportar el clima futuro, de acuerdo con las condiciones de desarrollo económico a nivel regional, bajo las que se emitirán GEI a la atmósfera.



Gráfica 6. Aptitud actual y con escenarios por superficie para *Abies religiosa*

Los escenarios A2, que presentaron valores de aptitud del terreno mayores que los de los B2, muestran un mundo muy heterogéneo con un aumento continuo en la población global y un crecimiento económico regional más lento, el cual está también más fragmentado. En los escenarios B2 se da un énfasis en soluciones locales a la sustentabilidad social, ambiental y económica.

En cuanto a cómo se percibieron o reflejaron los resultados dentro del aspecto económico, tomamos en cuenta primero que *Abies religiosa* sufrió una disminución progresiva en volumen de la producción maderable; en el año 2000 se produjo un

volumen de 163,150 m³r, mientras que en el año 2008 se obtuvo un volumen de 32,931 m³r, es decir, en este periodo hubo una disminución de 130,219 m³r (INEGI 2001 y 2009).

Si ocurre la pérdida de superficie apta que se proyecta con los escenarios de cambio climático, en especial la pérdida de 166,506 ha (99.61% de la superficie apta actual) que se proyectan para el escenario B2, año 2030 del modelo HADGEM, el cual arrojó los resultados más negativos para la especie, se provocará que la producción maderable en volumen descienda. No se cuenta con un cálculo de a cuánto ascenderán las pérdidas en volumen y valor de la producción, debido a que la información que arrojaron nuestros resultados reflejan las áreas que serán aptas para el desarrollo del oyamel, mas no el volumen de la producción maderable que se tendrá con estas proyecciones. No obstante, 99.61% del área apta que se estima como reducción como consecuencia del cambio climático, afectará la producción maderable y reducirá dramáticamente los ingresos para las diferentes unidades económicas relacionadas con el aprovechamiento forestal.

3.5.3 *Quercus rugosa*

A) Aptitud actual

El mapa de aptitud actual del terreno para *Quercus rugosa* (**Figura 17**), muestra zonas aptas para el desarrollo de esta especie al sur y suroeste de la entidad; la mayor área se encuentra en el suroeste, dentro de la subprovincia fisiográfica Depresión del Balsas, que pertenece a la provincia Sierra Madre del Sur; una porción menor se encuentra dentro de la subprovincia fisiográfica Lagos y Volcanes de Anáhuac, que pertenece a la provincia Eje Neovolcánico.

Si se comparan estas superficies aptas con la cartografía correspondiente al medio físico, se observa que éstas se encuentran distribuidas dentro de zonas que

corresponden principalmente al clima templado, subhúmedo. Se ven distribuidas sobre suelos cambisoles, andosoles y luvisoles, principalmente. La superficie apta para *Quercus rugosa* abarca aproximadamente 1.8% de la superficie de la entidad, equivalente a 40,121 ha.

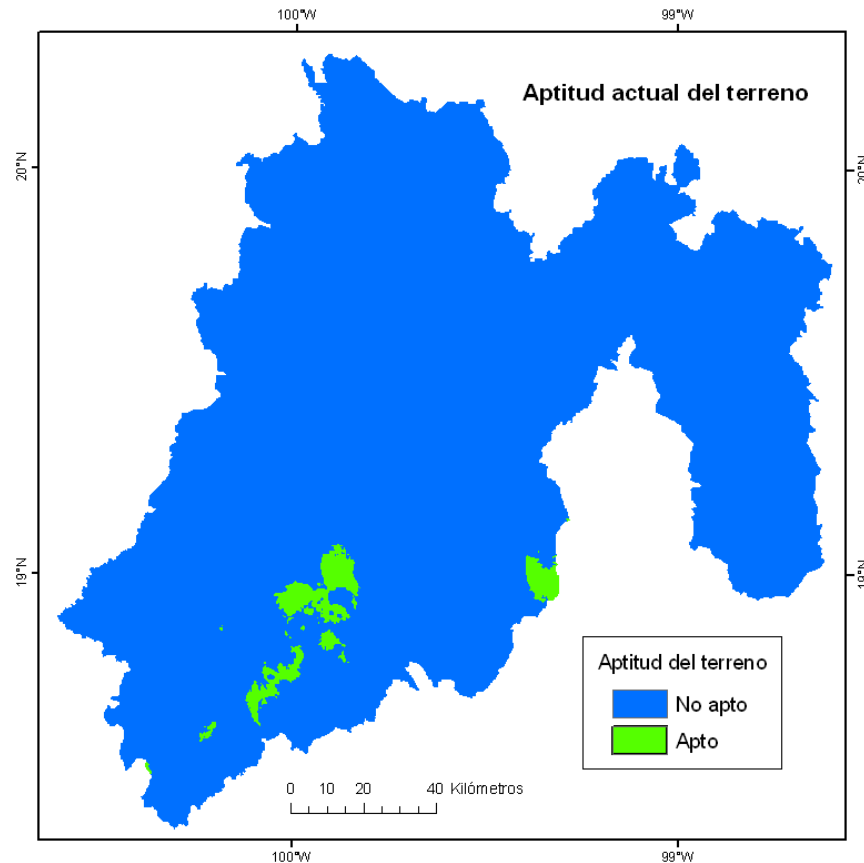


Figura 17. Aptitud actual del terreno para *Quercus rugosa*.Elaborado con base en cartografía digital de INEGI.

Al comparar las superficies de aptitud actual que se obtuvieron a partir de las variables empleadas, con los sitios de colectas para *Quercus rugosa*, se observa que coinciden solo en la parte sur del estado en algunos sitios. Esto se debe a que la combinación de los valores tomados de las fuentes de información empleadas, al momento de hacer las operaciones de álgebra de mapas, restringen las superficies aptas a las zonas en donde todas las variables tienen presencia a nivel de píxel. La **figura 18** muestra la distribución de estas superficies aptas y los sitios de colectas en el estado.

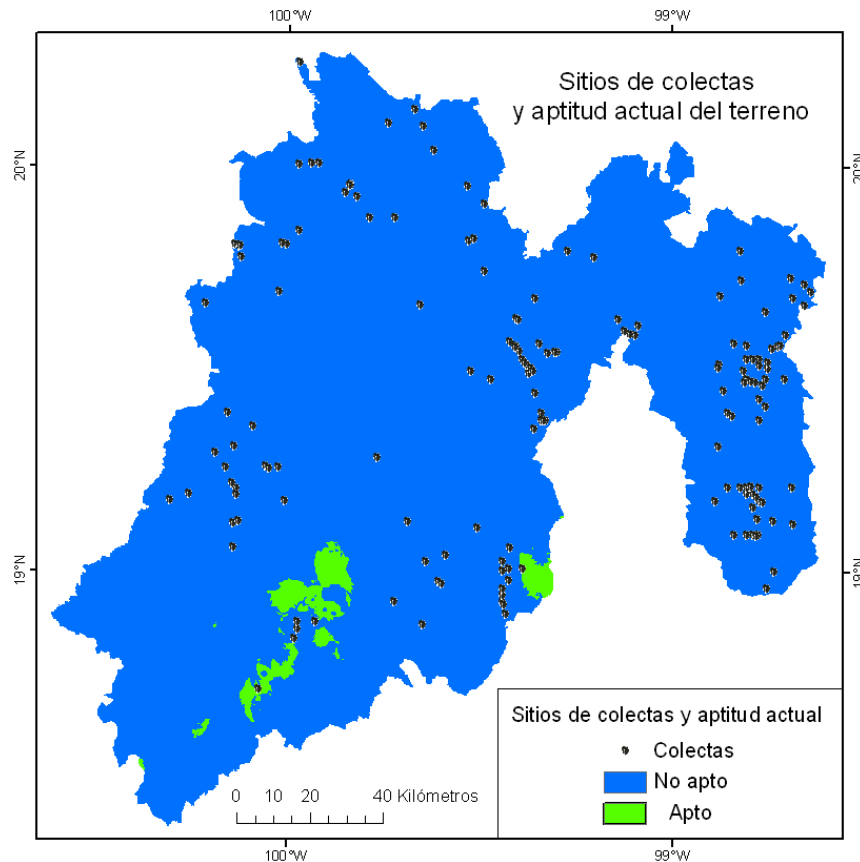


Figura 18. Sitios de colectas y aptitud actual del terreno para *Quercus rugosa*. Elaborado con base en cartografía digital de INEGI y los sitios de colectas registrados en el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de Conabio.

B) Aptitud bajo escenarios de cambio climático.

Al aplicar los escenarios de cambio climático, se dan cambios en la localización de *Quercus rugosa*; las zonas aptas se extienden desde el centro hacia el noroeste del estado y existen en menor proporción en el este, formando parte de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. En el mapa de aptitud actual estas superficies se encuentran al sur de la entidad, por lo que la nueva ubicación no comparte áreas con la distribución original. Estas áreas aptas varían en extensión de acuerdo con cada escenario.

Si se comparan estas superficies aptas con la cartografía correspondiente al medio físico, se puede observar que se encuentran distribuidas dentro de zonas

que corresponden casi en su totalidad al clima templado subhúmedo; se ven distribuidas principalmente sobre suelos vertisoles, feozem y solonchak, mismos que contrastan con los suelos presentes en el mapa de aptitud actual.

Los mapas generados para *Quercus rugosa* al emplear escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura, presentaron un aumento de las superficies aptas en todos los casos con respecto al mapa de aptitud actual. En la **tabla 8** se presentan los valores de aptitud actual de superficies y con la aplicación de los escenarios de los dos modelos.

Tabla 8. Superficie de aptitud actual y con escenarios de cambio climático para *Quercus rugosa*

	Aptitud actual	Escenario de cambio de climático							
		GFDL 2.0				HADGEM			
		2030		2050		2030		2050	
		A2	B2	A2	B2	A2	B2	A2	B2
Superficie apta (ha)	40,121	128,730	107,417	154,846	128,992	105,040	96,295	112,436	100,461
Porcentaje (%)*	1.8	5.8	4.9	7.0	5.8	4.7	4.3	5.1	4.5
Aumento (ha)**	-	88,609	67,296	114,725	88,871	64,919	56,171	72,315	60,340
Aumento (%)**	-	320.9	267.7	385.9	321.5	261.8	240.0	280.2	250.4
*Con respecto a la superficie estatal. **Con respecto a la superficie apta actual.									

Para el escenario A2 del modelo GFDL 2.0, año 2030, se obtuvieron 128,730 ha como superficie de aptitud para *Quercus rugosa*, equivalentes a 5.8% de la superficie total estatal. Este escenario tuvo una mayor extensión territorial apta respecto al escenario B2 del mismo modelo y año, con una diferencia de 21,313 ha; aumentó su superficie en un 320.9% con respecto a la actual, es decir, 0.9% más que el B2 en cuanto a la superficie estatal. Para el año 2050, con el mismo modelo, el escenario A2 registró la mayor superficie apta, que asciende a 154,846 ha (7.0% del área apta actual estatal); el B2, tuvo un área de 128,992 ha que representan 5.8% de la superficie estatal. Hay una diferencia de 25,854 ha entre

estos dos últimos escenarios; para el primero se dio un aumento con respecto a la superficie apta actual del 385.9%.

Con el modelo HADGEM, año 2030, el escenario A2 tuvo una superficie apta de 105,040 ha, misma que cubre 4.7% de la superficie estatal. Con el escenario B2 se obtuvieron 8,745 ha menos que con el A2, para el mismo modelo y año, lo que significa una diferencia en porcentaje de 0.4% en relación al escenario A2, pero un aumento en superficie apta con respecto a la actual de 240% y de 261.8% para el A2. Para 2050, el escenario B2 contó con 100,461 ha, 11,975 ha menos que con el escenario A2 del mismo modelo y año, el cual tuvo una superficie apta de 112,436 ha que, en cuanto a la superficie apta de la entidad, representan 0.6% más de superficie apta que el escenario B2 y 280.2% de aumento respecto a la superficie apta actual.

Se observó lo siguiente a partir de comparaciones hechas entre los resultados para los años 2030 y 2050. Respecto al año 2030, se obtuvo un menor aumento en superficie apta con el escenario B2 del modelo HADGEM, que equivale a 240.0% de la superficie apta actual, en contraste con un aumento mayor en superficie apta, obtenido con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0, que equivale a 320.9%. Para 2050, el escenario que presentó el menor aumento en superficie apta es el B2 del modelo HADGEM, que representa 250.4% de la superficie actual. El escenario que proyectó un mayor aumento es el A2, del modelo GFDL 2.0, equivalente a 385.9%.

Cabe hacer notar, que los escenarios A2, año 2050 del modelo GFDL 2.0 y B2, año 2030 del modelo HADGEM muestran los valores extremos en cuanto a superficie apta. El primer escenario tiene un área apta de 154,846 ha, que equivalen al 7.0% de la superficie del estado; el segundo tiene un área apta de 96,295 ha, que equivalen al 4.3%. Las **figuras 19 y 20** muestran los mapas con la distribución para estos escenarios.

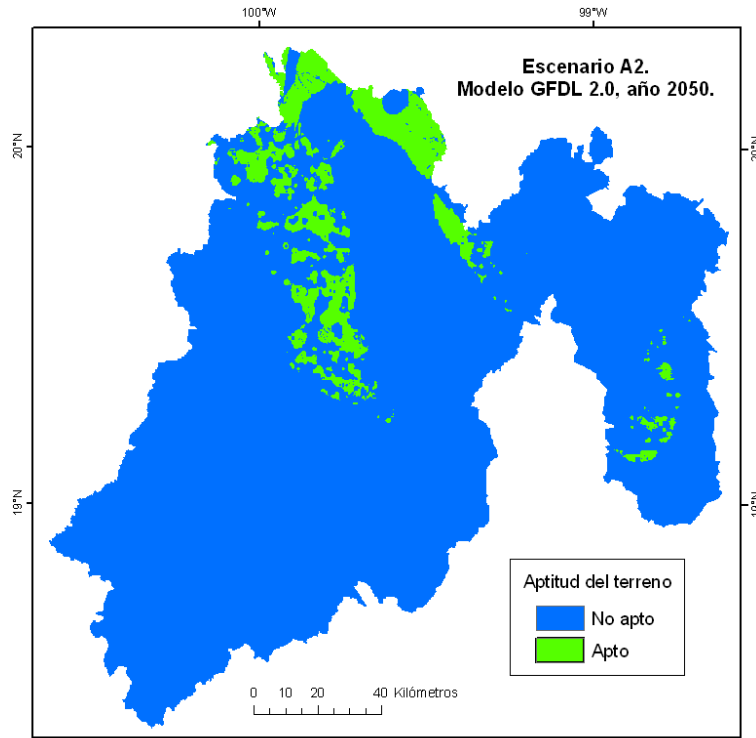


Figura 19. Distribución de *Quercus rugosa* con el escenario A2 del modelo GFDL 2.0 para el año 2050. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

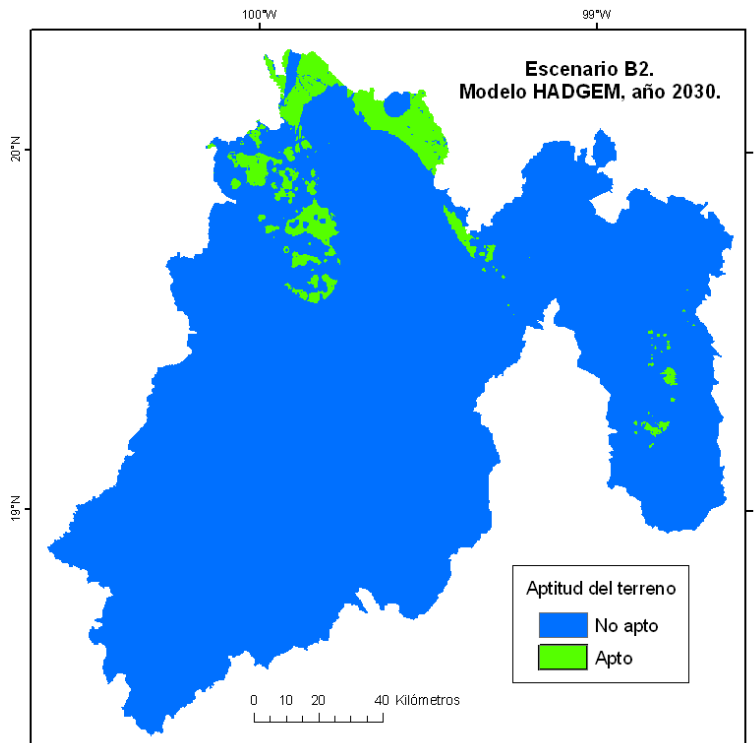
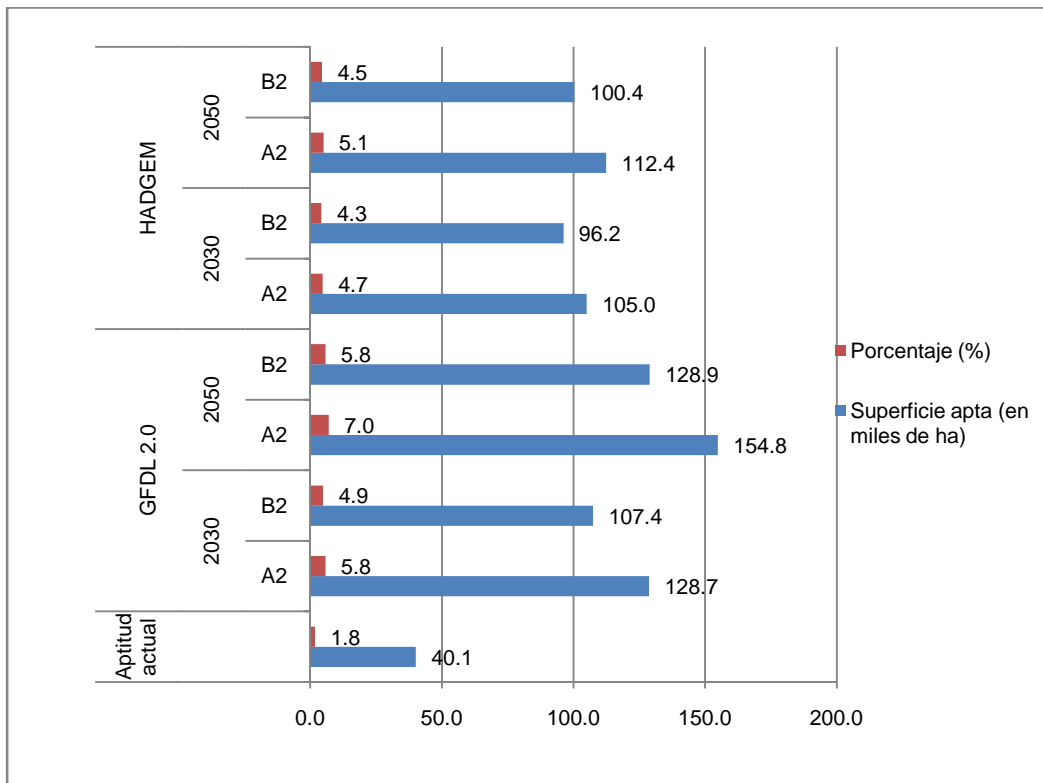


Figura 20. Distribución de *Quercus rugosa* con el escenario B2 del modelo HADGEM para el año 2030. Elaborado con base en escenarios de cambio climático para México. Temperatura y precipitación. Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, 2008.

En forma general, la superficie con aptitud para el desarrollo de *Quercus rugosa* bajo escenarios de cambio climático se presenta en la **gráfica 7**. Los porcentajes de áreas aptas con relación a la superficie estatal oscilaron entre 4.3 y 7.0%. Para 2030 los valores estuvieron entre 4.3% (escenario B2 del modelo HADGEM) y 5.8% (escenario A2 del modelo GFDL 2.0), con una diferencia de 32,435. Para 2050, los valores se tuvieron entre 4.5% (escenario B2 del HADGEM) y 7.0% (escenario A2 del GDFL 2.0, lo que equivale a una diferencia de 54,385 ha.

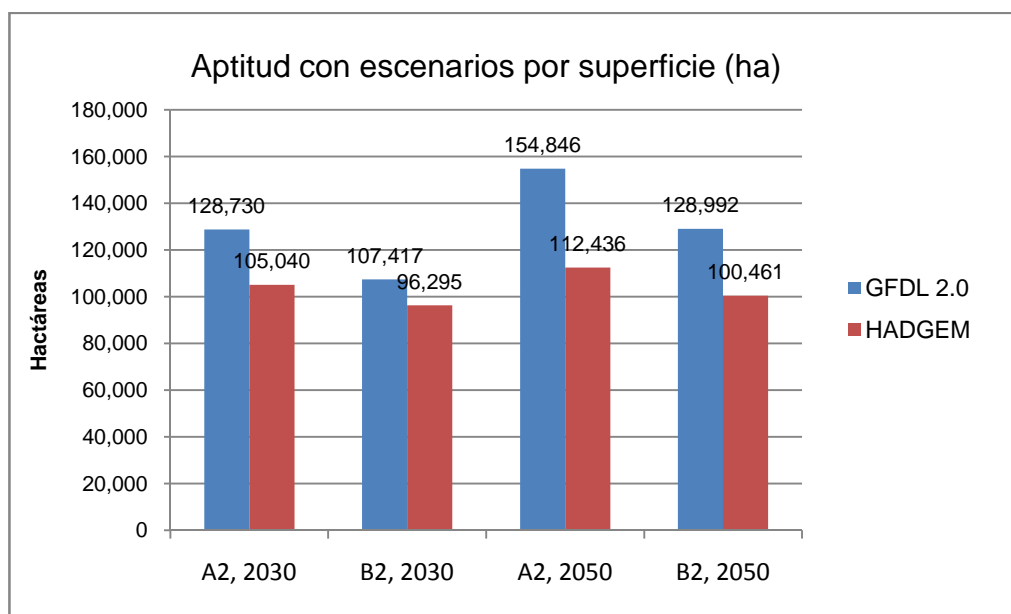


Gráfica 7. Superficies y porcentajes de aptitud actual y con escenarios para *Quercus rugosa* con respecto a la total del estado

La especie *Quercus rugosa* experimentó el mismo comportamiento que se da en los anteriores casos, en lo referente a las superficies aptas para todos los escenarios. El modelo HADGEM produjo menores aumentos en áreas aptas en comparación con el modelo GFDL 2.0 en todos sus escenarios, como se aprecia en la **gráfica 8**. Con esta especie vemos que los escenarios A2 muestran proyecciones más adecuadas para su desarrollo que los B2; lo que concuerda con

la definición teórica explicada sobre su comportamiento; en otras palabras, se observa que los escenarios A2 y B2 reflejaron las alternativas que se tienen respecto a cómo se podría comportar el clima futuro, de acuerdo con las condiciones de desarrollo económico a nivel regional, bajo las que se emitirán GEI a la atmósfera (IPCC, 2000).

Los escenarios A2, que presentaron valores de aptitud del terreno mayores que los de los B2, muestran un mundo muy heterogéneo con un aumento continuo en la población global y un crecimiento económico regional más lento, el cual está también más fragmentado. En los escenarios B2 se da un énfasis en soluciones locales a la sustentabilidad social, ambiental y económica.



Gráfica 8. Aptitud con escenarios de cambio climático por superficie para *Quercus rugosa*

En lo concerniente a cómo se percibieron o reflejaron los resultados dentro del aspecto económico para *Quercus rugosa*, sólo podemos decir que debido a que no se pudo disponer de los datos correspondientes al volumen, valor de la producción y distribución actual para la especie, es decir, sólo se tiene esta información para el género *Quercus*, no fue posible hacer una comparación directa entre los valores de producción entre la especie y el género.

No obstante, se sabe que el género *Quercus* sufre un aumento progresivo en volumen de la producción maderable. En el año 1996 se produjo un volumen de 3,265 m³r, en el 2000 se incrementó hasta 22,215 m³r, en el 2005 fue de 9,017 m³r, mientras que en el año 2008 se obtuvo un volumen de 18,566 m³r, es decir, en términos generales la producción maderable del encino se ha incrementado (INEGI, 2008).

El aumento en superficie apta del encino fue de 40,121 ha (que corresponden a la superficie apta actual) a 154,846 ha (385.9% de la superficie apta actual), para el escenario A2, año 2050 del modelo GDFL 2.0, con el cual se obtuvo la mayor superficie apta para la especie; esto provocará que la producción maderable en volumen aumente, así como también los ingresos para las diferentes unidades económicas relacionadas con el aprovechamiento forestal de *Quercus rugosa*.

Con respecto a la influencia de los escenarios de cambio climático sobre las variables de las especies estudiadas, se aprecia que las variables precipitación total anual y temperatura media anual son las que mayor influencia tendrán sobre la distribución de las especies evaluadas. Las características de las variables empleadas como el pH y la textura del suelo se podrían ver afectadas con el incremento de la precipitación de cerca del doble. El pH se acidificará, la textura sufrirá de pérdida de componentes arcillosos y limosos debido a su mayor exposición al agua de lluvia, y ocurrirá un lavado más frecuente del suelo con la consiguiente pérdida de nutrientes. La temperatura afectará estas variables de manera importante, ya que el incremento que presentará se estima entre 0.25 y 0.75 °C, lo que para el sistema climático se traduce en trastornos severos. Los suelos sufrirán degradación debido a la aceleración de procesos como el intemperismo combinado con la acidificación por el incremento de la precipitación. Los cambios mencionados en el suelo probablemente reducirán más la pérdida de superficies aptas.

La variación por altura en relación a la temperatura hará que *Abies religiosa* reduzca su distribución, ya que necesita de un rango de temperatura adecuado para su desarrollo, mismo que se desplazará a zonas más altas, con la altitud requerida.

Al comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con otros similares, se observa que, de acuerdo con los resultados de la distribución de las especies forestales, el mapa de aptitud actual para *Pinus patula*, generado en el presente trabajo guarda similitud con el mapa de Gómez *et al.* (2009), en cuanto a la distribución de superficies aptas. En el caso de *Abies religiosa*, las superficies aptas del mapa de Gómez *et al.* (2009) tienen otra distribución, la cual cubre una gran parte del estado, sobre todo en el centro, en el este y norte; además de una zona menor en el este. El mapa de aptitud actual de nuestro estudio tiene una superficie considerablemente menor, distribuida en el centro de la entidad, oeste del Distrito Federal, y otra al oeste y ligeramente al sur de la entidad mencionada. Otra zona apta, de dimensiones menores, se ubica al este de la entidad.

Con respecto a *Abies religiosa* Gómez, *et al.* (2009) concluyeron que será una especie poco afectada, ya que disminuye su aptitud natural en un 2.5% y 5.8% con los modelos GFDL 2.0 y HADGEM respectivamente (escenario A2, año 2050) respecto a la superficie nacional. Ese cambio se debe al incremento en la temperatura en todo el territorio nacional y la disminución de la precipitación. Los resultados anteriores difieren de los generados en este trabajo, ya que estos indican que podría perderse 98.78 y 99.18% de las superficies aptas con los modelos GFDL 2.0 y HADGEM respectivamente, lo que provocará que la especie desaparezca de la entidad después de 2050.

Con lo anterior, se pudo observar que los resultados de las proyecciones en el estudio de Gómez *et al.* (2009) y el presente, muestran que el modelo HADGEM es el que arrojó los resultados más desfavorables para la distribución de las

especies dentro de las áreas aptas para los años 2030 y 2050, con respecto al modelo GFDL 2.0.

Por otra parte, Arriaga y Gómez (2004), en su trabajo de evaluación para *Quercus rugosa* con el modelo HADCM2, obtuvieron una disminución en superficies aptas a nivel nacional (25.70%). Este resultado es diferente del obtenido en este trabajo, en el cual hubo aumentos de superficie apta en el estado de México con los dos modelos empleados.

Por lo anterior, se deduce que la diferencia de los resultados de los tres estudios mencionados se debe fundamentalmente al uso de variables distintas, empleadas en cada evaluación, a los rangos de requerimientos establecidos y la escala de trabajo utilizada en cada estudio, así como también los modelos de circulación de la atmósfera empleados; esto nos indica que los valores de aptitud obtenidos no necesariamente representan la realidad.

En general, se tiene que este tipo de estudios sirven para orientarnos en la determinación de estrategias de adaptación y mitigación del sector forestal ante el cambio climático. Ya que, de acuerdo con Magaña *et al.* (2004), la comparación entre las condiciones actuales y las potenciales identifican y cuantifican el grado de vulnerabilidad de un territorio, dejando observar los efectos adversos en reducciones de la superficie forestal. Las tendencias de cómo ocurrirán la precipitación y temperatura en el estado de México serán de que habrá aumentos en ambas en la parte norte de la entidad, donde existe actualmente un clima seco y semiseco. Por otro lado, queda vulnerable al aumento de temperatura, la zona templada, donde se encuentran los bosques de pino, encino y oyamel.

3.6. Acciones de adaptación y mitigación recomendadas

A partir de los cambios en superficie y distribución de las superficies aptas para las especies forestales evaluadas bajo los escenarios empleados en el estado de México, se proponen las siguientes medidas de adaptación para enfrentar los efectos del cambio climático:

Adaptación

- Diseñar sistemas de plantaciones y reforestación con especies que resistan las condiciones climáticas proyectadas con los escenarios, en áreas desocupadas por las especies de pino, oyamel y encino.
- Efectuar la explotación forestal de efectos reducidos que evite las extracciones irracionales de madera dentro del estado de México
- Instrumentar una vigilancia forestal intensiva que proporcione indicaciones de alerta temprana sobre muerte regresiva del bosque, brotes de agentes parásitos y enfermedades, así como de incendios.
- Reconfigurar espacialmente y fortalecer el sistema de áreas protegidas y de ecosistemas frágiles, mediante la aplicación de políticas, estrategias y planes de manejo sustentable que permitan conservar la diversidad de especies y recursos genéticos, tomando en cuenta los potenciales cambios en la aptitud del terreno.
- Efectuar una migración asistida de las especies forestales hacia áreas donde se encuentren las condiciones ambientales adecuadas para éstas, las cuales estarían ubicadas al norte de donde se encuentran las áreas aptas actuales.
- Controlar los aprovechamientos de *Abies religiosa*, promoviendo la explotación de árboles sustitutos con el propósito de permitir su oportuna regeneración.
- Reforzar las capacidades institucionales en el estado de México y de cooperación con otras entidades para apoyar la investigación de ecosistemas frágiles y de vulnerabilidad de las especies forestales, como es el *Abies religiosa*, considerando la posible redistribución de las especies frente al cambio climático
- Promover la investigación sobre el aprovechamiento de otras especies con potencial maderable como las especies de *Quercus*.
- Generar conocimiento sobre la correcta selección de las especies a transformar en productos maderables (como la de *Quercus*), así como invertir

recursos financieros públicos y privados en la instrumentación de nuevas metodologías para transformar estas especies en madera de mayor calidad,

- Promover productos alternativos en sustitución al uso de la madera.
- Trabajar sobre el ordenamiento territorial en el estado para controlar el crecimiento urbano o rural y los cambios en el uso del suelo en relación al uso agrícola y de pastizales.

Mitigación

Las acciones de mitigación recomendadas a nivel general van encaminadas hacia la reducción de GEI hacia la atmósfera. Con este propósito se proponen las siguientes:

- Generar planes de reforestación para acrecentar los depósitos y sumideros del carbono.
- Establecer medidas de control contra la deforestación y degradación de los bosques y suelos en la entidad para la conservación de los recursos forestales; así como ayuda para la regeneración de la vegetación.
- Diseñar planes de plantaciones forestales que funcionen como sumideros de carbono.
- Incentivar el uso de especies forestales de uso múltiple dentro del espacio agropecuario, que permitan mejorar las condiciones ambientales y la captación de carbono en comunidades rurales.
- Promover cambios en la legislación sobre la creación de estímulos para la conservación de los bosques, así como eliminar estímulos para actividades relacionadas con la deforestación como la ganaderización, la explotación minera y la agricultura.
- Crear fuentes alternativas de ingresos para la población.

La **tabla 10** muestra las medidas de adaptación y mitigación pertinentes, aplicables a las especies estudiadas.

Tabla 9. Medidas de adaptación y mitigación para *Pinus patula*, *Abies religiosa* y *Quercus rugosa*

Especie	<i>Pinus patula</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Quercus rugosa</i>
Acciones de adaptación			
Explotación forestal de efectos reducidos.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Plantar especies más resistentes a cambios en el clima.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Conservación y preservación.		<input checked="" type="checkbox"/>	
Vigilancia forestal.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Fortalecer el sistema de áreas protegidas y de ecosistemas frágiles.		<input checked="" type="checkbox"/>	
Efectuar una migración asistida de las especies forestales.		<input checked="" type="checkbox"/>	
Acciones de mitigación			
Control de la deforestación, degradación y reforestación.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Utilización en sumideros de carbono.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Acciones de adaptación/mitigación			
Promover la manufactura de productos madereros.	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Promover el manejo en el plano comunitario.	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Aprovechar las ventajas obtenidas por el cambio climático.			<input checked="" type="checkbox"/>
Mejoramiento sobre el conocimiento de la especie para optimizar su aprovechamiento.			<input checked="" type="checkbox"/>
Eliminar estímulos para actividades relacionadas con la deforestación.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

3.7. Conclusiones

Las especies forestales evaluadas en el estado de México, en orden de importancia según su superficie apta actual son: *Pinus patula*, *Quercus rugosa* y *Abies religiosa*.

Con escenarios de cambio climático, el clima cálido húmedo tendrá una mayor distribución dentro de la entidad; por consecuencia, la aptitud de los terrenos para las especies forestales evaluadas tenderán a disminuir y su distribución se dirigirá hacia el norte del estado.

La aptitud forestal del terreno de las especies evaluadas bajo escenarios de cambio climático con los modelos GFDL 2.0 y HADGEM, presentó reducciones en superficies para *Pinus patula* y *Abies religiosa*. La situación contraria se presentó con *Quercus rugosa*, cuyos escenarios fueron favorecidos con un aumento en superficie apta.

Abies religiosa presentó una situación riesgosa, pues los resultados de los escenarios generan una disminución significativa de la superficie apta en la entidad; esto implica prácticamente la desaparición de la especie de entidad y al mismo tiempo la aparición de un problema ecológico.

Entre las acciones de adaptación sugeridas para afrontar el cambio climático de acuerdo con los cambios de aptitud del terreno están: el diseño de plantaciones y reforestación con especies que resistan las condiciones climáticas proyectadas, así como la explotación forestal de efectos reducidos, la vigilancia forestal intensiva que proporcione alerta temprana sobre distintos fenómenos perjudiciales para las especies en las áreas que podrían sufrir de pérdida de aptitud para las especies en cuestión, o donde las nuevas condiciones climáticas estimulen la aparición de tales fenómenos; la migración asistida de las especies hacia áreas donde se encuentren las condiciones ambientales adecuadas para éstas, de acuerdo con los límites dentro de los que se proyectan los cambios de aptitud del terreno.

El conocimiento sobre otras especies con potencial maderable y su industrialización, puede ayudar a relajar la demanda de especies como *Abies religiosa*, cuya distribución podría reducirse, al reducirse las zonas aptas donde actualmente se encuentra.

Las acciones para mitigar los efectos del cambio climático encaminadas hacia la reducción de GEI hacia la atmósfera, en cuanto a evitar reducir y degradar las masas forestales o incrementar los sumideros de carbono, guardan relación con

las áreas aptas potenciales resultantes, en términos de que estas áreas que podrían reducirse en el caso de dos de las tres especies estudiadas, hacen más complejo e importante mitigar y revertir los efectos del cambio climático si se quiere conservar o ampliar su área de distribución actual.

Recomendaciones para mejorar estudios posteriores sobre el tema

Deben utilizarse más variables relacionadas con el clima, ya que los elementos y factores de éste, desarrollan interrelaciones complejas, que en nuestro caso conviven con el estudio de modelos climáticos. Por ello, deben tomarse en cuenta, de ser posible, variables como los índices de evapotranspiración, la exposición con respecto al sol de las especies y otros aspectos referentes a la precipitación y temperatura.

Deben tomarse en cuenta variables que son susceptibles a cambiar como el crecimiento urbano, pues son determinantes en la afectación de los sistemas forestales.

Se recomienda el uso del análisis multicriterio y niveles de aptitud para la evaluación de aptitud del terreno, los cuales procesan la información considerando instrumentos estadísticos para asignar el grado de importancia a las variables, con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad.

Recomendamos el empleo de niveles de aptitud del terreno en la evaluación, con el propósito de obtener resultados con mayor nivel de detalle.

Se debe fomentar el perfeccionamiento de los modelos de proyecciones climáticas y el mejoramiento de la resolución que son capaces de ofrecer, para obtener una evaluación más precisa y detallada.

Desde los centros de investigación encargados de cartografiar el territorio y los recursos naturales del país, se deben hacer esfuerzos para aumentar la calidad de

la información generada, ya que los resultados de trabajos como éste, dependen en gran medida de la disponibilidad de los insumos adecuados.

Los órganos que proveen de información agroecológica para especies forestales, deben realizar investigaciones más profundas acerca de los requerimientos de las mismas, ya que los resultados de trabajos como éste, dependen de que la información disponible sea confiable.

Fuentes de información

- Agrosoft, 2000. *Pinus patula Schl. Et Cham*. Serie Especies forestales. Medellín, Colombia. 15 p
Página electrónica:
http://www.oeidrustab.gob.mx/paquete_basico/med_amb/fichas_tecnicas/ficha_tecnica_pinus_pat_sp.PDF. Consultada el 20 de octubre de 2009.
- Aguilar, A. 2000. "Los asentamientos humanos y el cambio climático en México. Un escenario futuro de vulnerabilidad regional". En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Gay, C. (Compilador) 2000. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. US Country Studies Program. México. D. F. 220 p.
- Anónimo, 2006. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. *Marco para la Coordinación entre Administraciones Públicas para las Actividades de Evaluación de Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático*. Oficina Española de Cambio Climático. S. G. para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. 59 p. Página electrónica:
http://www.presidencia.gub.uy/_web/cambio_climatico/Plan_Nal_Espana.pdf
Consultada el 6 de noviembre de 2009.
- Anónimo, 2009. Don't forget the second D. *The importance of including Degradation in a REDD Mechanism*. 5 p. The Nature Conservancy. Página electrónica:
http://www.nature.org/initiatives/protectedareas/files/tnc_degradation_policy_brief_lowres.pdf. Consultada el 10 de febrero de 2010.
- Apps, M., Kurz, W., Luxmoore, R., Nilsson, L., Sedjo, R., Schmidt, R., Simpson, L. y Vinson, T. 1993. "Boreal Forests and Tundra". En: *Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes: Quantification and Sources of CO₂*. Wisniewski, J. y Sampson, R.N. Editores. Kluwer Academic Publishers. Holanda. 696 p.
- Arriaga, L. y Gómez, L. 2004. "Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México". En: Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. *Cambio Climático: una visión desde México*. Semarnat-INE. 525 p.
- Ávalos, G. 2007. "Reacción del mundo ante el problema: la colaboración internacional". Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Instituto Nacional de Ecología. En: *Cambio Climático: una visión desde México*. Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. (Compiladores) 2004. Semarnat-INE. México. 525 p.
- Ayllón, T. 2003. *Elementos de meteorología y climatología*. Trillas. México. 211 p.
- Batis M., Alcocer, M., Gual, M., Sánchez, C., y Vázquez-Y, C. 1999. *Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Instituto de Ecología, UNAM-Conabio. México, D.F. Página electrónica:
http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/J084_Fichas%20de%20Especies.pdf. Consultada el 25 de junio de 2010.
- Bernardus, H., Masera, O y Hernández-Tejeda, T. "Opciones de captura de carbono en el sector forestal". 2004. En: *Cambio Climático: una visión desde México*. Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. (Compiladores) 2004. http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/J084_Fichas%20de%20Especies.pdf. SEMARNAT-INE. México, D.F. 525 p.

- Bernier, P. y Schoene, D. 2009. *La adaptación de los bosques y su ordenación al cambio climático: una visión de conjunto*. FAO. Unasylva. (60) 5-11. Página electrónica: <http://www.forestadaptation2008.net/en/>. Consultada el 9 de agosto de 2009.
- Bouma, W., Pearman, G. y Manin, M. 1996. *Greenhouse. Coping with climate change*. CSIRO, Australia, 566 p.
- Bray, D., Durán, E., Durán, E., Merino, L., Torres, J. y Velázquez, A. 2007. *Nueva Evidencia: los Bosques Comunitarios de México. Protegen el Ambiente, Disminuyen la Pobreza y Promueven Paz Social*. UNAM, Centro de Investigación y Docencia Económica, CIIDIR-Oaxaca, IPN, Universidad Internacional de Florida y Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C. México. 26 p.
- Burroughs, W. 2007. *Climate change. A multidisciplinary approach*. Cambridge University Press. United Kingdom. 378 p.
- Cáceres, L. 2001. *Vulnerabilidad-Adaptación y Mitigación al Cambio Climático. Compendio de medidas, estrategias y perfiles de proyectos de los sectores energético, forestal, agrícola, marino costero y recursos hídricos*. Comité Nacional sobre el Clima. Ministerio del ambiente-PNUD. Ecuador. 103 p.
- Carpenter, C. 1991. *The Changing World of Weather*. Guinness Publishing, London. U.K. 191 p.
- CCMSS. 1999. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible., A. C. México. Página electrónica: http://www.ccmss.org.mx/modulos/casillero_servicios.php. Consultada el 6 de octubre de 2009.
- Cervantes, Y., Cornejo, S., Lucero, R., Espinoza, J., Miranda, E. y Pineda, A. 1990. "Clasificación de Regiones Naturales de México II, IV.10.2". *Atlas Nacional de México*. Vol. II. Escala 1:4,000,000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Challenger, A. 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro*. CONABIO, Instituto de Ecología, UNAM y Agrupación Sierra Madre S.C. México, D.F. 847p.
- Challenger, A. 2009. *Introducción a los servicios ambientales*. Semarnat-INE. Página electrónica: http://www.ine.gob.mx/descargas/con_eco/2009_sem_ser_amb_pres_01_achallenger.pdf. Consultada el 18 de noviembre de 2009.
- Ciesla, W. 1996. *Cambio climático, bosques y ordenación forestal*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Estudio FAO Montes 126. Roma, Italia. 102 p.
- Conabio, 1999. Carta de Hipsometría. México. Escala 1:250,000. Extraído del Inventario de Información Geográfica de INEGI (1992). México.
- Conabio, 2010. *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. Plantas: *Abies religiosa* 55 registros. Angiospermas: *Quercus rugosa* 228 registros.
- Conabio-Pronare, 2006. *Sistema de Información para la Reforestación*. SIRE. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Programa Nacional de Reforestación. Paquetes tecnológicos. Especies varias. Página electrónica: http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=24. Consultada de octubre a noviembre de 2009.

- Conafor. 2009. *Servicios ambientales*. Página electrónica: http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=46&Itemid=146. Consultada el 20 de octubre de 2009.
- Conde, C., Martínez, B., Sánchez, O., Estrada, F., Fernández, A., Zavala, J., Gay, C. 2008. *Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación*. Página electrónica: http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74>. Consultada el 11 de agosto de 2009.
- Condit, R. 1998. *Ecological implications of changes in drought patterns: shifts in forest compositions in Panama*. *Climatic Change*. (39) 1-21.
- Confalonieri, U., Menne, B., Akhtar, R., Ebi, K., Hauengue, M., Kovats, R., Revich, B. y Woodward, A. 2007: Capítulo 8. "Human health". En: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 976 p.
- Cosgrove, B. 1992. *Weather*. Eyewitness Book, London. 485 p.
- Dale, H. 2001. Climate change and forest disturbance. *BioScience*. (9) 723-734.
- Daily, G. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press. New York, EUA. 392 p.
- De la Paz, C., Dávalos, R., Guerrero, E. 2000. *Aprovechamiento de la madera de encino en México*. 10 (001) 10-12.
- Del Castillo, A. 2010. *Árboles gigantes al borde de la extinción*. Guadalajara, Jalisco, México. Página electrónica: <http://agustindelcastillo.blogspot.com/2010/07/arboles-gigantes-al-borde-de-la.html>. Consultada el 12 de noviembre de 2009.
- Del Castillo, R., Pérez, J., Vargas, G. y Rivera, R. 2004. *Coníferas*. Instituto de Biología. UNAM. Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza. World Wildlife Fund. Redacta S. A. de C. V. México. 258 p.
- Díaz, G. 2007. "Potencial agroproductivo de especies forestales en México". En: Fernández, R., Ortíz C., Reyes, M., F. de J. Legorreta P., García G. *Reporte anual de investigación e innovación tecnológica*. INIFAP. México, D. F. 304 p.
- Eguiarte, L. 1997. Informe final, segunda versión del Proyecto B138. *Niveles y patrones de variación genética del género Abies en México*. INE. Departamento de Ecología Evolutiva, Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental. UNAM. 50 p.
- Eguiluz, T. 1978. *Ensayo de Integración de los Conocimientos sobre el Género Pinus en México*. Tesis profesional. Universidad Autónoma de Chapingo. Depto. de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. México. 623 p.
- Estrada, P. 2001. "Cambio climático global: causas y consecuencias". Notas. *Revista de información y análisis*. México. (16) 10-11. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/articulos/ambientales/climatico.pdf>. Consultada el 3 de diciembre 2009.

- FAO. 1976. "A framework for land evaluation". *Soils Bulletin* 32. Food and Agriculture Organization, Roma. 122 p.
- FAO, 2000. ECOCROP 1. *The FAO Crop Environmental Requirements Databases*. Página electrónica: www.ecocrop.fao.org. Consultada durante los meses de octubre y noviembre de 2009.
- FAO. 2003. *Evaluación de tierras con metodologías de FAO*. Proyecto regional ordenamiento territorial rural sostenible. Santiago, Chile. 26 p. Página electrónica: <http://www.rlc.fao.org/proyecto/139jpn/document/2ordenam/talleres/tevt/tfaoevt/doctall/apunteev.pdf>. Consultada el 10 de noviembre de 2009.
- Galindo, L. 2008. *La Economía del Cambio Climático en México. Síntesis*. Semarnat-SHCP. 67 p. Página electrónica: <http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/articulos/Galindo%20La%20eco%20del%20CC%20Sintesis2009.pdf>. Consultada el 12 de noviembre de 2009.
- García, E. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), (1998). *Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García)*. Escala 1:1,000,000. México.
- Gay, C., Conde, C., Sánchez, O. 2008. *Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación*. [Documento en línea]. Disponible desde internet en http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74. Consultada el 19 de mayo de 2010.
- Gómez, J., Monterroso, A. y Tinoco, J. 2007. *Distribución del cedro rojo (Cedrela odorata L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático*. Madera y bosques. Instituto de Ecología A. C. Jalapa, México (13) 2 29-49. Página electrónica: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61713204&iCveNum=10127>. Consultada el 9 de agosto de 2009.
- Gómez, J., Monterroso, A., Tinoco, J. y Toledo, M. 2009. *Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Semarnat-INEUNAMCCA-UACH. México. 274 p. Página electrónica: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/descarga.html?cv_pub=615&tipo_file=pdf&filename=615. Consultada el 20 de junio de 2010.
- Goodess, P. y Davies, P. 1992. *The nature and causes of climate change. Assessing the long term future*. Belhaven Press London. Reino Unido. 342 p.
- Hopkin, M. 2005. "Greenhouse-gas levels highest for 650,000 years". *Nature*. (17) 536-537.
- INEGI. 1997. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Anuario estadístico. Estado de México. *Aspectos económicos. Agropecuario, silvicultura y pesca. Silvicultura*. Página electrónica: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/biblioteca/default.asp?accion=2&upc=702825155223&seccionB=bd. Consultada el 30 de octubre de 2009.
- INEGI. 1999. Anuario estadístico. Estado de México. *Aspectos económicos. Agropecuario, silvicultura y pesca. Silvicultura*. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee99/estatal/mex/index.htm>. Consultada el 30 de octubre de 2009.

- INEGI. 2001. Anuario estadístico. México. *Silvicultura*. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/ae01/estatal/mex/index.htm>. Consultada el 30 de octubre de 2009.
- INEGI, 2005. *Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación. Serie III*. Escala. 1:250,000. México.
- INEGI. 2006. *Anuario estadístico*. México. *Aprovechamiento forestal*. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/ae06/estatal/mex/index.htm>. Consultada el 30 de octubre de 2009.
- INEGI. 2007. *Anuario Estadístico*. México. Tomo I. 576 p.
- INEGI. 2008a. *Anuario Estadístico*. México. Tomo I. 532 p.
- INEGI. 2008b. *Sistema para la consulta del anuario estadístico de México*. Página electrónica: <http://inegi.org.mx/lib/buscador/bibliotecas/busqueda.aspx?Page=2&pagesize=10%textoBus=estado%20de%20>. Consultada el 6 de septiembre de 2009.
- INEGI. 2009. Anuario estadístico. México. *Aprovechamiento forestal*. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/sisnav/default.aspx?proy=ae&edi=2009&ent=15>. Consultada el 30 de octubre de 2009.
- INIFAP. 2008. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Texturas del suelo en el estado de México según FAO-WRB. Escala 1:50,000.
- INIFAP y Conabio. 1995. *Mapa edafológico*. Escala 1:250,000 y 1:1,000,000. México.
- IPCC, 1996. Intergovernmental Panel of Climate Change. *Tecnologías, Políticas y Medidas para Mitigar el Cambio Climático*. Documento técnico I. 94 p.
- IPCC. 1998. *The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability. A special Report of IPCC Workers Group II*. Cambridge University Press. 558 p.
- IPCC. 2000. IPCC Special Report. *Emissions Scenarios*. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. 27 p. Página electrónica: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>. Consultada el 11 de febrero de 2010.
- IPCC. 2002. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Cambridge University Press. Cambridge, New York. 397 p.
- IPCC, 2007. *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Appendix I: Glossary. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 p.
- IUFRO, 2009. International Union of Forest Research Organizations. *Adaptation of Forests and People to Climate Change. A Global Assessment Report*. IUFRO. World Series. Volume 22. Helsinki. 224 p.
- Landa, R., Magaña, V. y Neri, C. 2008. *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Semarnat. México. 197 p.
- Linder, M., Lasch, P. y Erhard, M. 2000. "Alternative forest management strategies under climatic change. Prospects for gap model applications in risk analyses". *Silva Fennica* 34(2):

101–111. Página electrónica: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf34/sf342101.pdf>. Consultada el 10 de septiembre de 2010.

- Magaña, V. y Gay, C. 2002. *Vulnerabilidad y Adaptación Regional ante el Cambio Climático y sus Impactos Ambiental, Social y Económicos*. INE. Gaceta Ecológica. México D. F. octubre-diciembre, (65) 7-23.
- Magaña, V., Matías, J., Morales, R. y Millán, C. 2004. "Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México". En: *Cambio Climático: una visión desde México*. Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. (Compiladores) 2004. Semarnat-INE. México. D. F. 525 p.
- Mansilla, M. 2007. *Compilación y síntesis de los estudios de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático*. Proyecto Estudios de cambio climático con énfasis en adaptación. Programa Nacional de Cambio Climático. Guatemala. Página electrónica: <http://www.nicap.net/fileadmin/NCAP/Countries/Guatemala/O-1-032135.0601xx.GUA.CON-01.Output1.v1.pdf>. Consultada el 29 de octubre de 2009.
- Manson, H. 2004. "Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México". *Madera y bosques*. INE, Xalapa, México. 10 (001), 3-20. Página electrónica: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/617/61710101.pdf>. Consultada el 3 de diciembre de 2009.
- Markham, A. 1996. *Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologist*. Cr Special. Climate Research. London, U. K. 6 (2) 179-191.
- Martínez, J., Fernández, B. y Osnaya, P. (Compiladores) 2004. *Cambio Climático: una visión desde México*. Semarnat-INE. México. 525 p.
- Martínez, M. 1948. *Los Pinos Mexicanos*. 2ª Ed. Botas. México, D.F. 361 p.
- Martínez, M. 1954. *Los encinos del estado de México II*. Trabajos de la Comisión Botánica exploradora del estado de México. Gobierno del estado de México. Dirección de Agricultura y Ganadería. México. 86 p.
- Martínez, M. 1981. "Los encinos de México". Anales del Instituto de Biología. Serie técnica No. 8. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. México. 258 p.
- Masera, O. 1996. "Desforestación y degradación forestal en México". *Documento de Trabajo 19*. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro, Michoacán, México. 50 p.
- Mayrand, K. y Paquin, M. 2004. *Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes*. Montreal, Canadá. 57 p. Página electrónica: http://www.cec.org/files/PDF/ECONOMY/PES-Unisfera_es.pdf. Consultada el 10 de noviembre de 2009.
- McGuffie, K. and Henderson-Sellers, A. 2005. *A Climate Modelling Primer*, Third Edition. John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom. 280 p.
- Moreno, A. y Urbina, J. 2008. *Impactos sociales del cambio climático en México*. INE-Semarnat. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). México, D. F. 71 p.
- ONU, 1992. Organización de las Naciones Unidas. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Página electrónica:

- <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>. Consultada el 26 de noviembre de 2009.
- Probosque. 2010. Protectora de Bosques del Estado de México. Gobierno del estado de México. Página electrónica: <http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/probosque/restauracion/reforestacion/bo sbicen>. Consultada el 16 de noviembre de 2009.
- Ruiz, M., García, C., Sayer, J. 2007. *Los servicios ambientales de los bosques*. AEET. España. Ecosistemas. 16 (3) 81-90. Página electrónica: <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/509.pdf>. Consultada el 6 de mayo de 2010.
- Rzedowski, J. y Equihua, M. 1987. *Atlas cultural de México. Flora*. SEP. INAH. Grupo Editorial Planeta. 224 p.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F. 504 p.
- Sáenz R., C., Guzmán R., R. and Rehfeldt, G.E. 2006. "Altitudinal genetic variation among Pinus oocarpa populations in Michoacán, México; implications for seed zoning, conservation of forest genetic resources, tree breeding and global warming". *Forest Ecology and Management* 229:340-350
- Salusso, E. 2008. *Regulación Ambiental: Los Bosques Nativos. Una Visión Económica*. Universidad de Belgrano. Buenos Aires, Argentina. 92 p.
- Santiago, J., López, M., y López, S. 2008. *Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados*. Universidad Indígena de México. Sinaloa, México. Ra Ximha, (3) 625-663.
- Semarnap, 1998. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. *México ante el cambio climático*. INE. México, 1998. 42 p. Página electrónica: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/descargas/01_mex_ante_cc.pdf. Consultada el 14 de abril de 2010.
- Semarnat, 2006. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2006*. Página electrónica: http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/administrador/sistemas/archivoslasdemas/1264204932_anuario_2006.pdf. Consultada el 20 de septiembre de 2009.
- Semarnat-INE, 2008. Cambio climático en México. *Adaptación al cambio climático*. Página electrónica: http://cambio_climatico.ine.gob.mx/adaptacioncc/adaptacionnacional.html Consultada el 4 de noviembre, 2009.
- Seppala, R., Buck, A. y Katila, P. (editores). 2009. Policy Brief. *Making Forests Fit for Climate Change. A Global View of Climate-Change Impacts on Forests and People and Options for Adaptation*. Ministry for Foreign Affairs of Finland. International Union of Forest Research Organizations. 39 p. Página electrónica: <http://www.forestadaptation2008.net/17676-0-0.pdf>. Consultada el 9 de agosto de 2010.
- Serrano, E. 2002. "Contribución al conocimiento del México forestal". Notas. *Revista de información y análisis* (22) 13-14. Página electrónica: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/Articulos/ambientales/forestal.pdf>. Consultada el 8 de diciembre de 2009.

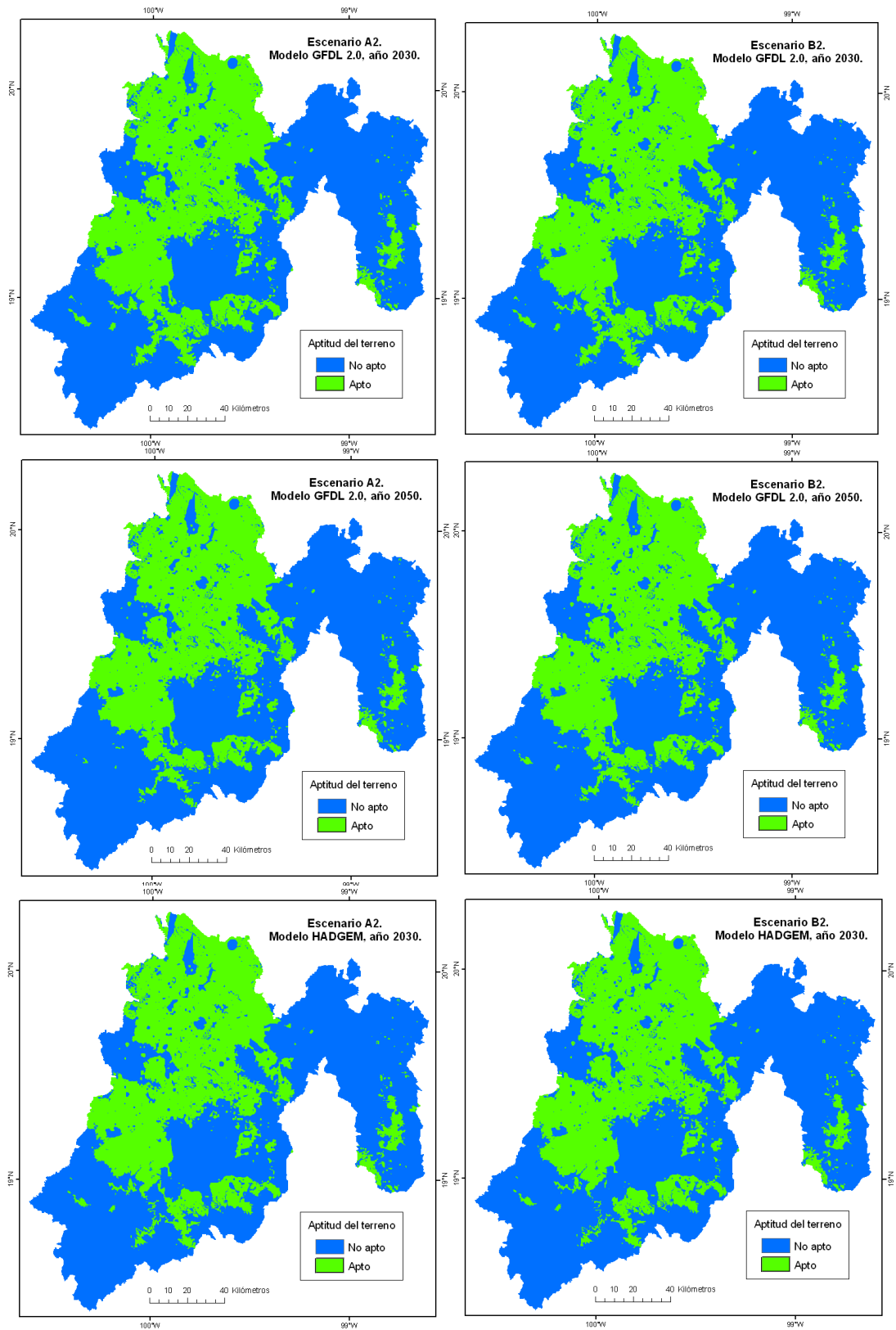
- Stadtmuller, T. 1994. "Impacto Hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Una revisión bibliográfica. CATIE. *Colección silvicultura y manejo de bosque naturales*. (10) 62 p.
- Stratus Consulting, Inc., 2004. *Adaptación al Cambio Climático: Hermosillo, Sonora, Un estudio de caso*. Universidad Nacional Autónoma de México y El Colegio de Sonora. 66p. Página electrónica: http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/adap_cclimatico.pdf. Consultada el 30 de octubre de 2009.
- Trejo, I. 1999. "El clima de la selva baja caducifolia en México". UNAM. Instituto de Geografía. *Investigaciones Geográficas*. Boletín 39. 52 p. Página electrónica: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/boletin/bol39/b39art2.pdf>. Consultada el 6 de diciembre de 2009.
- UNDESA, 2009. United Nations Department of Economic and Social Affairs. *Forests: the Green and REDD of Climate Change*. DESA Climate Change Working Group. No. 16. Página electrónica: <http://www.un.org/esa/policy/policybriefs/policybrief16.pdf>. Consultada el 7 de febrero de. 2010
- Villers, L. y Trejo, I. 2007. "El cambio climático y la vegetación en México". En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Gay, C. (Compilador) 2000. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. US Country Studies Program. México, 220 p.
- Walsh, K. y Pittock, A. *Potential Changes in Tropical Storms, Hurricanes, and Extreme Rainfall Events as a Result of Climate Change*. 1998. Página electrónica: <http://www.springerlink.com/content/h6x255k7610r1811/>. Consultada el 7 de agosto, 2009.
- Wilbanks, T., Romero, P., Bao, M., Berkhout, F., Cairncross, S., Ceron, J., Kapshe, M., Muir-Wood, R. y Zapata-Martí, R. 2007: "Industry, settlement and society". En: *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2007. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 851 p.

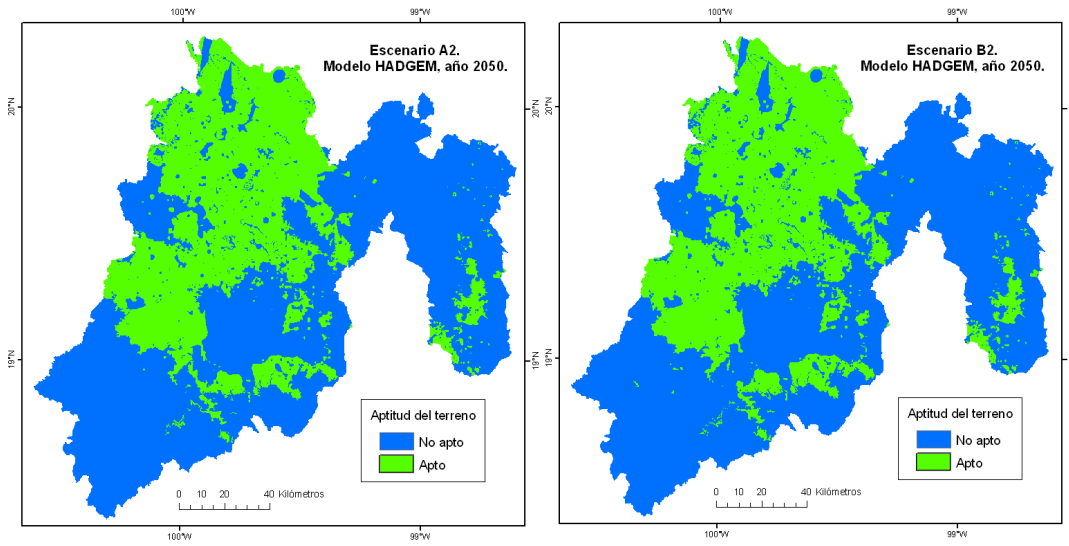
Anexo

Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para las tres especies seleccionadas

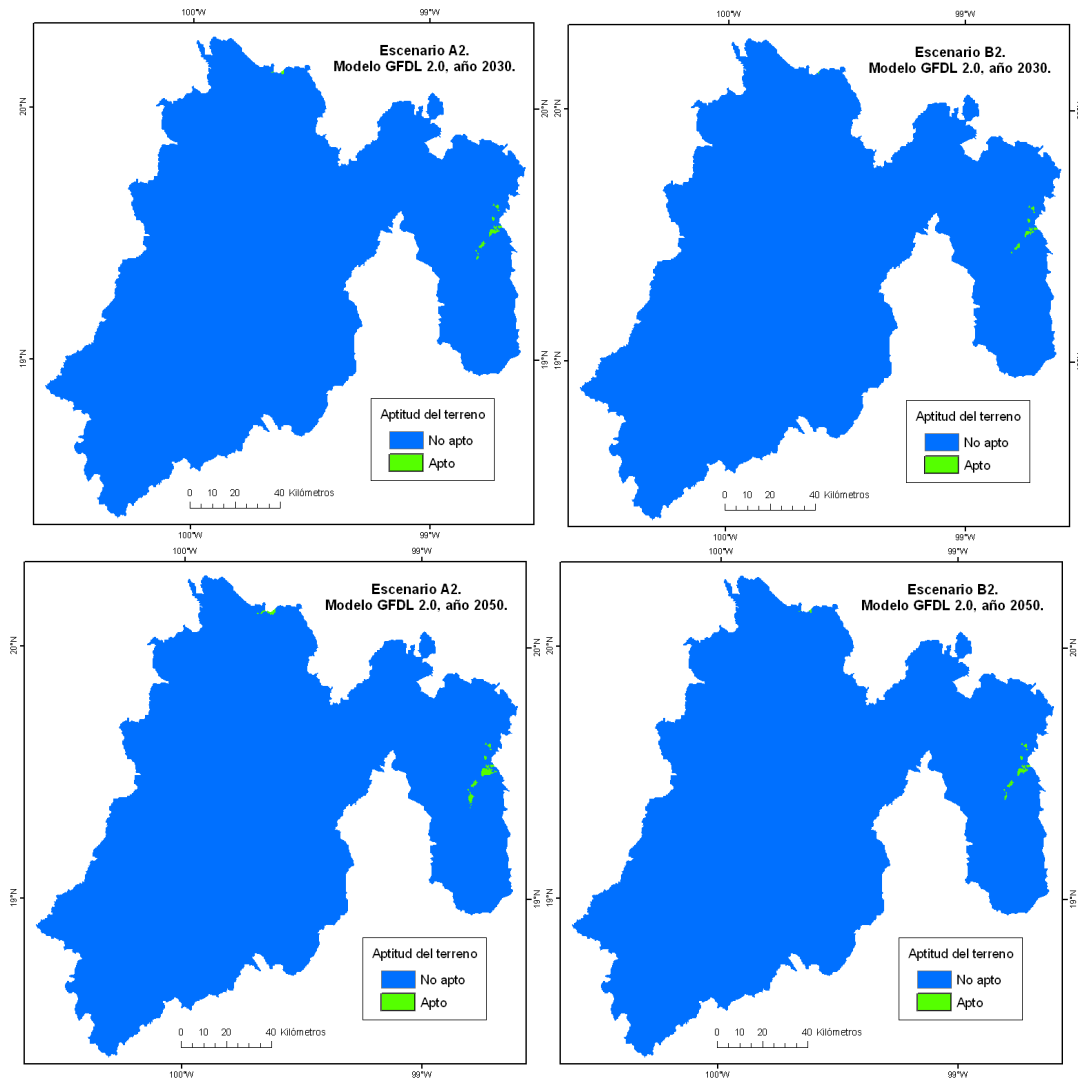
1. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Pinus patula*
2. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Abies religiosa*
3. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Quercus rugosa*

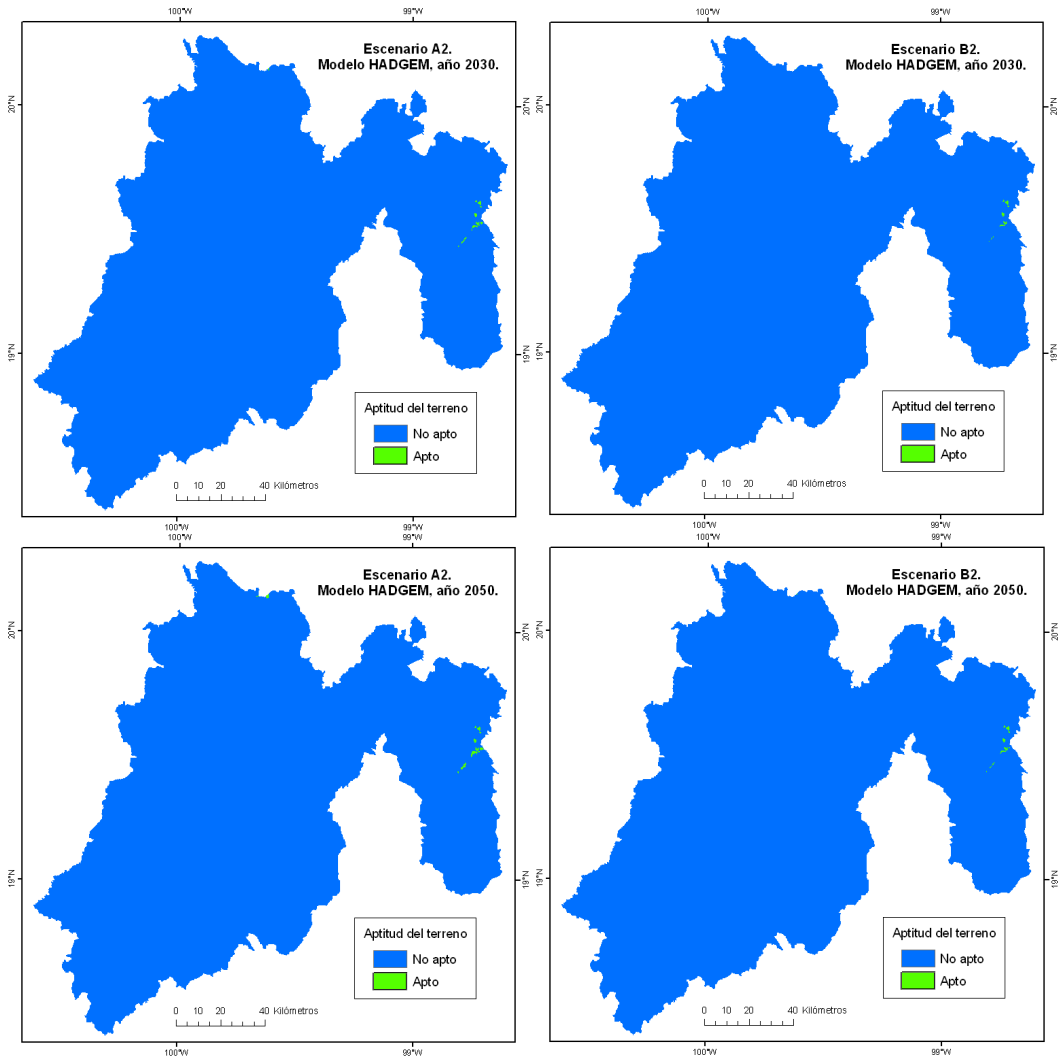
1. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Pinus patula*





2. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Abies religiosa*





3. Cartografía de aptitud del terreno con escenarios de cambio climático para *Quercus rugosa*

