



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Distribución potencial de los bosques templados de Coahuila bajo los escenarios A2 y B2 generados por ECHAM5 y HADGEM1

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA

OSCAR AGUADO BAUTISTA

Director de Tesis:

Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz.
México, DF., 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
Secretaría General
División de Estudios Profesionales

Votos Aprobatorios

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales
Facultad de Ciencias
Presente

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

Distribución potencial de los bosques templados de Coahuila bajo los escenarios A2 y B2 generados por ECHAM5 y HADGEM1

realizado por **Aguado Bautista Oscar** con número de cuenta **3-0311405-1** quien ha decidido titularse mediante la opción de tesis en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario Dr. Héctor Mario Benavides Meza

Propietario Dr. Enrique Martínez Meyer

Propietario Tutor Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz

Suplente Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez

Suplente M. en C. Martín Enrique Romero Sánchez

Atentamente,

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Ciudad Universitaria, D. F., a 28 de mayo de 2010

EL COORDINADOR DEL COMITÉ ACADÉMICO DE LA LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

DR. PEDRO GARCÍA BARRERA

FACULTAD DE CIENCIAS



UNIDAD DE ENSEÑANZA
DE BIOLOGÍA

Aguado
Bautista
Oscar
Tel. 51204003
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
303114051

2. Datos del tutor

Dr.
Ordóñez
Díaz
José Antonio Benjamín

3. Datos del sinodal 1

Dr.
Benavides
Meza
Héctor Mario

4. Datos del sinodal 2

Dr.
Martínez
Meyer
Enrique

5. Datos del sinodal 3

Dra.
Conde
Álvarez
Ana Cecilia

6. Datos del sinodal 4

M. en C.
Romero
Sánchez
Martín Enrique

7. Datos de la tesis

Distribución potencial de los bosques templados de Coahuila, bajo los escenarios A2 y B2 generados por ECHAM5 y HADGEM1
76 p
2010

A la gente que lucha día a día con el sudor de su frente.

En el Universo todo cuenta, hasta la partícula subatómica más pequeña.

El mundo necesita de todas las ideas por diminutas que sean.

Maravillémonos de lo magnífico que son todos.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser la casa de estudios de miles de investigadores del país y brindarle a millones de personas la posibilidad de formarse en ella.

A mi tutor el Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz por dirigir la tesis. A los revisores Dr. Enrique Martínez Meyer, Dr. Héctor M. Benavides Meza, Dra. Ana Cecilia Conde, M en C. Martín Enrique Romero Sánchez y Lic. Ma. Bibiana Bautista González, por sus comentarios y correcciones.

A Irma Estefanía García Sánchez por acompañarme en la elaboración de este trabajo y porque juntos aprendimos de esta experiencia, las sorpresas malas y buenas del campo de la ciencia.

A Adrián, Alejandro, Ulises, Rafa, Hilda, Diana, Vanessa, Lucía, Regina, Vitzia por los momentos compartidos en la carrera y sus contribuciones a la biología, desde lo molecular hasta la macroecología.

A Luis Arturo Aguado Bautista y Arturo Aguado Romero por su participación en la parte de informática de éste trabajo.

A Paco, Ma. Crispina, Josefina, Carlos, Paola, Jessiel, Juvenal, Roberto, Jean, Israel, Horacio, Rosa, Erika, Noemí, Lulú y todos aquellos que hacen que la vida se disfrute como en el país de las maravillas.

A México por tener muchos objetos de estudio y diversos problemas que son una oportunidad para los futuros investigadores.

RECONOCIMIENTO

ESTE TRABAJO SE REALIZÓ CON EL APOYO DEL FONDO MIXTO CONACYT-COAHUILA COMO PARTE DEL PROYECTO “PERSPECTIVAS SOBRE LA CLIMATOLOGÍA Y DISPONIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL ESTADO DE COAHUILA PARA LOS PRÓXIMOS AÑOS.” CONVENIO COAH-2008-CO7-93005.

Contenido	Página
Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del problema	4
2. Antecedentes	6
2.1. Marco de referencia	6
2.2. Marco teórico	8
2.2.1. El clima y su relación con la biota	8
2.2.2. Los bosques templados de México	12
2.2.3. La modelación climática: modelos generales y de área limitada	15
2.2.4. Escenarios climáticos	18
2.2.5. Modelos ECHAM5 y HadGEM1	20
2.2.6. El nicho ecológico y los modelos de distribución de especies	21
2.2.7. MaxEnt	23
3. Objetivo general	25
3.1. Objetivos particulares	25
4. Hipótesis	25
5. Zona de estudio	26
5.1. Ubicación geográfica y fisiografía	26
5.2. Geología	26
5.3. Clima	26
5.4. Vegetación	27
6. Método	29
6.1. Preprocesamiento	30
6.2. Calibración del modelo MaxEnt	34
6.3. Validación del modelo	34
6.4. Postprocesamiento	35
7. Resultados	36
7.1. Mapas de probabilidades de ocurrencia	36
7.2. Escenarios A2	46
7.3. Escenarios B2	50
7.4. Validación del modelo y análisis de las variables bioclimáticas (Análisis de los coeficientes de correlación de las variables).	55
8. Discusión	58
9. Conclusión	62
10. Recomendaciones	62
11. Referencias.	64

Índice de Cuadros

	Página
Cuadro 1. Seis de los 23 modelos utilizados para el modelado climático a gran escala.	16
Cuadro 2. Características de los escenarios climáticos	20
Cuadro 3. Principales algoritmos utilizados para el modelado de la distribución de especies.	23
Cuadro 4. Matriz de Confusión	24
Cuadro 5. Variables ambientales utilizadas para la distribución potencial de los bosques templados de Coahuila.	31
Cuadro 6. Porcentajes de cobertura de las distribuciones potenciales de los bosques templados para cada uno de los escenarios.	54
Cuadro 7. Coeficientes de correlación de las variables climáticas utilizadas en el modelado.	55

Índice de Figuras

	Página
Figura 1. Principales familias de escenarios y líneas evolutivas donde se establecen las características socioeconómicas futuras.	19
Figura 2. Topografía del estado de Coahuila	28
Figura 3. Diagrama de flujo de la método empleado para la obtención de los mapas de la distribución potencial de los bosques templados en un futuro, debido al cambio climático.	29
Figura 4. Método a <i>grosso modo</i> utilizado por Hijmans et al. (2005) para obtener una mayor resolución y reducir la escala.	30
Figura 5. Procedimiento para visualizar los valores contenidos en los archivos descargados del Atlas Climático de forma correcta.	32
Figura 6. Puntos de presencia de los bosques de Coahuila obtenidos del Inventario Nacional Forestal.	33
Figura 7. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados actualmente, de acuerdo a las condiciones climáticas que se presentan en cada pixel.	37
Figura 8. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados en los diferentes pixeles que conforman el mapa para el escenario E30A2.	38
Figura 9. Mapa donde se muestran los valores de las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados de Coahuila, para el escenario B2 modelado con ECHAM5.	39
Figura 10. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, donde las probabilidades altas se presentan en una proporción más grande que las observadas en los mapas anteriores. Escenario H30A2.	40
Figura 11. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, empleando las salidas del modelo HadGEM1 para el escenario B2.	41
Figura 12. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados bajo el escenario A2, donde los valores más altos se presentan en los colores claros y en oscuro los más bajos. Escenario E50A2.	42
Figura 13. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados para el escenario E50B2.	43

- Figura 14. Las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, para cada una de las combinaciones climáticas registradas en cada uno de los píxeles del mapa, cuyas variaciones climáticas provienen del escenario A2 modelado con HadGEM1. 44
- Figura 15. Mapa donde se expresan las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, donde los píxeles con los colores más claros tienen los valores más altos de probabilidad. Escenario H50B2. 45
- Figura 16. Distribución potencial de los bosques templados bajo los escenarios A2 modelados con ECHAM5 para los años 30 y 50. Las distribuciones se encuentran superpuestas sobre la capa del escenario actual. 47
- Figura 17. Mapas del *clamping*. (a) Los resultados para el escenario E30A2, mientras que (b) para el escenario E50A2. La gama de rojos representan las probabilidades más altas, mientras que los azules las más bajas. 48
- Figura 18. Distribución potencial de los bosques templados bajo los escenarios H30A2 y H50A2. Las distribuciones se encuentran superpuestas sobre la distribución actual potencial. En el caso del escenario H30A2 el área que cubre en el mapa tiene una distribución espacial totalmente diferente a la actual y la del escenario H50A2. 49
- Figura 19. Resultados del *clamping* para los escenarios (a) H30A2 y (b) H50A2, donde se puede apreciar que existe un efecto mayor cuando se realiza el *clamping* en el escenario H30A2 que en el H50A2. 50
- Figura 20. Distribuciones potenciales para los escenarios E30B2 y E50B2. Las distribuciones se encuentran superpuestas en la actual. La distribución con menor cobertura es la del escenario E50B2, la cual está superpuesta en gran parte sobre la cobertura del escenario E30B2. 51
- Figura 21. Resultados del *clamping* donde las posibilidades de que existan áreas afectadas por esto son casi nulas. (a) E30B2 y (b) E50B2. 52
- Figura 22. Distribución potencial de los bosques templados para los escenarios H30B2 y H50B2. Las distribuciones se encuentran superpuestas. La que tiene menor cobertura y una distribución espacial diferente es la del escenario H50B2. 53

Figura 23. Resultados del <i>clamping</i> para los escenarios (a) H30B2 y (b) H50B2. Sólo en el escenario H50B2, se presentan muchas áreas con probabilidades de ser afectadas por el <i>clamping</i> .	54
Figura 24. Porcentajes de contribución de cada variable al modelo de máxima entropía.	56
Figura 25. Mapa de las probabilidades de ocurrencia de la proyección H50B2 con las variables con coeficientes de correlación mayores a 0.85.	56
Figura 26. Curva ROC para el modelo de máxima entropía donde los valores del área bajo la curva son mayores que las distribuciones al azar. La sensibilidad representa las presencias acertadamente predichas, mientras que la especificidad las ausencias predichas.	57
Figura 27. Diagramas de Venn donde se muestra el modelo de proyección en espacio y tiempo. Las combinaciones actuales (I), interceptan las futuras (II) en un momento determinado (B). Cuando se hace una proyección se toman ciertas combinaciones del círculo (I), lo que es representado con la circunferencia punteada. Las combinaciones que en el presente se pueden hacer son las del espacio de A y todas las que no se pueden hacer son las de C.	59

Resumen

Se realizó una modelación de la distribución potencial de los bosques templados de Coahuila para los años 2030 y 2050, bajo los cambios propuestos en los escenarios climáticos A2 y B2 desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM mediante el empleo de los modelos ECHAM5 y HadGEM1.

El modelado fue realizado por medio del programa de cómputo MaxEnt, el cual emplea un algoritmo de máxima entropía para generar una distribución de las especies en base a registros de presencia y diferentes variables ambientales. Los registros de presencia de los bosques templados de Coahuila se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal, de los cuales 85% de los registros se usaron para la prueba de entrenamiento y el 25% para la evaluación, mientras para las variables ambientales se emplearon siete parámetros bioclimáticos y una variable edáfica. Una vez obtenidas las probabilidades de ocurrencia de cada proyección, se utilizó el umbral igual sensibilidad y especificidad del entrenamiento para determinar la presencia y ausencia de los bosques. La validación del modelo fue mediante la prueba del área bajo la curva (AUC), cuyos valores fueron 0.94 para los datos de entrenamiento y 0.95 para los de prueba.

Las distribuciones obtenidas bajo los escenarios climáticos mostraron una reducción de la cobertura de los bosques en más del 60% en comparación con la actual, aunque probablemente dichas diferencias sean menores, si muchos de los valores de las variables climáticas se sujetan a los valores encontrados en el entrenamiento del modelo, lo cual se podría solucionar con el empleo de otras variables climáticas con menores coeficientes de correlación de los obtenidos en este estudio. Aún con todo esto se puede observar que los bosques del estado de Coahuila son altamente vulnerables al cambio climático, por lo cual se recomienda el desarrollo de programas de manejo sostenible de los bosques y el monitoreo constante de los cambios climáticos.

Introducción

El estudio del clima en la actualidad ha adquirido una gran relevancia, debido a los cambios tan drásticos que ha tenido éste en los últimos años, lo que ha motivado el desarrollo de herramientas que expliquen el comportamiento de los componentes climáticos y su relación con los seres vivos, siendo necesario el conocimiento de diferentes disciplinas y el desarrollo de nuevos conceptos.

El clima se define como la condición promedio de muchos estados del tiempo (atmosférico), sucedidos en períodos de meses, años, décadas o siglos (Castro, 2007; Conde, 2007), consecuencia de la interacción que existe entre la atmósfera, los océanos, los continentes y los seres vivos; cuyos principales factores que lo determinan son: la altitud, la latitud, el relieve y la distribución de tierras y cuerpos de agua (Conde, 2007). Éstas características son explicadas en la primera sección de los antecedentes. Mientras que en la sección de la zona de estudio se aborda lo relacionado a los climas de Coahuila y los tipos de vegetación que se presentan (basado en Miranda y Hernández X. citado por Rzedowski, 2006): bosque mixto, bosque de coníferas, bosque de encino, bosque de galería, palmar, matorral xerófilo, chaparral y pastizal.

Es sabido que las condiciones climáticas han cambiado, dada la dinámica de los factores que influyen en el clima, motivando al ser humano a investigar cómo predecir aquello que sucederá con el clima y de esta forma tomar las decisiones necesarias para que las sociedades humanas no sufran algún daño o catástrofe (Lamb, 1982). De hecho, la mayoría de las civilizaciones prehispánicas, le atribuían una deidad a cada uno de los fenómenos naturales, lo que indica la importancia que desde entonces tiene el clima para el humano y las diferentes explicaciones que se le asocian. Por lo tanto, no es de extrañarse que existan muchas formas de predecir el clima, desde aquellas que hace la gente empíricamente, hasta las realizadas por los diferentes grupos científicos que investigan el clima (Lamb, 1982). De lo anterior, se puede decir que una predicción es uno de los tantos resultados de un análisis climático, cuya precisión y veracidad dependerá de los criterios que se hayan utilizado.

Debido a esto y a que hoy en día las actividades humanas han modificado considerablemente los patrones climáticos del mundo (IPCC, 2007), es necesaria la realización de escenarios climáticos, los cuales son imágenes alternativas de cómo sería el mundo en el futuro, si uno o varios factores se modifican, mostrando diferentes aspectos de lo que podría suceder en los próximos años, proporcionando más información que una predicción, puesto que ésta sólo daría una posibilidad única, limitando las opciones de adaptación para el cambio climático (Carter *et al.*, 2007b). De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, (IPCC por sus siglas en inglés), la elaboración de escenarios de cambio climático son indispensables para la implementación de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático (Carter *et al.*, 2007a; Randall *et al.*, 2007).

La realización de escenarios climáticos a escala estatal o mesoescala implican el empleo de Modelos Atmosféricos de Área Limitada (Pérez, 2001) o bien, de la interpolación de los modelos globales aplicados en un área determinada para obtener una alta resolución y un mejor análisis climático a nivel local. Puesto que los modelos utilizados por el IPCC, Modelos de Circulación General Atmosféricos (MCGA) y Modelos de Circulación General Atmosféricos acoplados al Océano (MCGAO), sólo simulan las condiciones climáticas a nivel global y para que puedan simular el clima a nivel local requieren de muchos recursos computacionales, para lograr una resolución suficientemente satisfactoria (Pérez, 2001; Harvey *et al.*, 1997). El empleo de los Modelos de Área Limitada o Modelos Regionales, es debido a que estos cuentan con las siguientes particularidades: a) la simulación en un período largo de tiempo se genera con un mínimo error, atribuido principalmente a los forzantes utilizados o condiciones de frontera; y b) reproduce con alta precisión la orografía y el uso del suelo asociados (Pérez, 2001).

Aún con las ventajas de los Modelos de Área Limitada, muchas veces se ha optado por el uso de las interpolaciones de los MCGAO a un área específica, puesto que los modelos climáticos regionales requieren de muchos conocimientos y de tiempo de

cómputo para su desarrollo. Por tanto, en este trabajo se ha optado por el empleo de datos interpolados para México de los escenarios A2 y B2 generados por los modelos globales ECHAM5 y HADGEM1 para los horizontes 2030 y 2050, disponibles en el Atlas Climático Digital de México, elaborados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. En la última sección de los antecedentes se da una explicación de los MCGAO, los modelos regionales y la interpolación de las salidas de los MCGAO, así como sus ventajas y desventajas.

Una vez entendiendo los escenarios climáticos del futuro previamente modelados, es necesario establecer la relación que tienen las variables climáticas con la biodiversidad. Esto se hace mediante el uso de programas de cómputo los cuales se basan en el concepto de nicho ecológico propuesto por Hutchinson en 1957 (Rosas, 2008; Milesi y López, 2005; Harmon *et al.*, 2005; Hutchinson, 1957). Los programas computacionales tienen diferentes algoritmos, por lo cual es preciso definir para qué fines se utilizarán (Benito y Peñas, 2007). En este trabajo se empleó el modelo MaxEnt para hacer las proyecciones futuras de la distribución de los bosques a partir de los cambios en las variables climáticas. La aplicación de MaxEnt en este estudio se expone en el método de la tesis. Por último, en la discusión y conclusiones se detallan los alcances y limitaciones de este trabajo.

1. 1. Planteamiento del problema

México cuenta con una alta diversidad de ecosistemas, por lo que conservarlos depende mucho de las acciones que se desarrollen como estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático, provocado por el aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases como el metano (CH₄), los hidrofluorocarburos (HFC), los perfluorocarburos (PFC), el hexafluoruro de azufre (SF₆), los clorofluorocarburos (CFCs) y los óxidos nitrosos (N₂O), consecuencia de las actividades humanas (Ordóñez, 2008; PRTR-España, 2007; Ahrens, 2001; IPCC, 2000).

Esta diversidad también se ve reflejada en el estado de Coahuila por medio de los endemismos que alberga, como es el caso de la flora y fauna de la región de Cuatrociénegas (Aldama *et al.*, 2007). En sus bosques templados se pueden encontrar diferentes endemismos como son: *Abies durangensis* var. *coahuilensis* [(Johnst) Martínez, 1942], (Gymnosperm Database, 2009; Nava-Cruz *et al.*, 2006; Jiménez-Guzmán y Zúñiga-Ramos, 1991); mientras que *Quercus carmenensis*, *Q. coahuilensis*, *Q. gravesii*, *Q. hintoniorum*, *Q. invaginata* y *Q. saltillensis*, son considerados endemismos bajo el criterio de Megacoahuila utilizado por Villarreal (2002), el cual abarca Coahuila y 50 km hacia los estados adyacentes (Villarreal y Encina, 2005; Encina y Villarreal, 2002); y *Pinus greggii* (Engelm) es un endemismo para la región III Sierra Madre Oriental, de la cual Coahuila es parte (Sánchez-González, 2008).

Muchos de estos endemismos son preservados en el estado de Coahuila junto con más del 80% de su vegetación natural (SEMARNAT, 2005), aunque sus ecosistemas actualmente son vulnerables ante el cambio climático (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1998) y a la deforestación, cuya tasa en el país es entre 0.4% y 2.5% (INEGI, 2009; Flamenco y Mas, 2009; Comité Intersecretarial de Cambio Climático, 2006). Por lo cual es necesario generar bases científicas que permitan elaborar programas de manejo y ordenamiento de los recursos naturales dirigidos al modelo de desarrollo sostenible, a través de estudios climáticos relacionados con la vegetación (evaluaciones de impacto¹), (White *et al.*, 2003; Füßel y van Minnen, 2001), puesto que la vegetación es hábitat y fuente de alimentación de muchos otros seres vivos formando parte de lo que se conoce como producción primaria en la ecología (Townsend *et al.*, 2008; Begon *et al.*, 2005). Del mismo modo, un cambio en la vegetación puede contribuir a una retroalimentación positiva en el calentamiento global (Ganopolski *et al.*, 1998).

¹ *Evaluación de impacto*. Concepto propuesto por el IPCC, referido a la identificación y evaluación de las ventajas o desventajas del cambio climático en los sistemas naturales (Füßel y Klein, 2006).

2. Antecedentes

2.1. Marco de referencia

El desarrollo de escenarios y predicciones por medio de modelos climáticos casi siempre se ha hecho en países del primer mundo y pocas veces en países en vías de desarrollo, como México. A pesar de esto, se han empezado a elaborar algunos trabajos sobre modelado climático en nuestro país (Conde *et al.*, 2008b).

Los diferentes trabajos que existen en México sobre el modelado climático, afortunadamente han explorado las diversas metodologías hasta ahora existentes, siendo los tres métodos más comunes: 1) modelación mediante los MCGAO de alta resolución; 2) uso de los modelos regionales; 3) métodos empíricos-estadísticos (Schoof *et al.*, 2009; Conde *et al.*, 2008b). Algunos de los trabajos realizados con los modelos globales interpolados para México son los realizados por el Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, quienes elaboraron los escenarios A1B, A2, B1 y B2 para México por medio del software MAGICC/ScenGen, utilizando tres modelos globales: ECHAM5, GFDL2.0, HADGEM1 (GCCRS, 2009; Conde *et al.*, 2008b).

En la publicación “México: una visión hacia el siglo XXI - El cambio climático en México”, compilada por el Dr. Carlos Gay (2000), se pueden encontrar diversos estudios con la aplicación de los modelos globales. En ella se publica el estudio de vulnerabilidad de los asentamientos humanos elaborado por Adrián Aguilar, mediante el empleo del modelo GFDL-R30 y una de las versiones del modelo del *Canadian Climate Center* (CCC), para el horizonte 2025 (Aguilar, 2000). Utilizando los mismos modelos, Hernández y colaboradores (2000) realizaron un estudio de las zonas vulnerables de México a la sequía meteorológica dado un cambio climático, cuyos resultados, particularmente para el estado de Coahuila son del 10% de superficie bajo el modelo CCC y 7.7% con el modelo GFDL-R30 (Hernández *et al.*, 2000).

Otros trabajos donde se han empleado los dos modelos antes mencionados son los de Sánchez y Martínez (2000), quienes elaboraron un estudio de vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos y el de Maderey y Jiménez (2000) en donde hicieron un análisis de los recursos hidrológicos del centro de México ante el cambio climático. Conde y otros autores (1997) hicieron un estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz mediante el modelo CERES-MAIZE y el uso de los modelos globales GFDL-R30 y CCC.

Así mismo, Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez (1998) utilizaron el GFDL-R30 y el CCC para analizar el efecto del cambio climático sobre la vegetación de México, en donde para los estados del norte del país se predijo un aumento de entre 3 y 4 °C con el modelo CCC y de 2.5 y 3.5 °C con el modelo GFDL para la mayoría de los estados del país, particularmente de 3.5 a 4 °C en la frontera de Coahuila. En tanto que para la precipitación, el modelo CCC predice una reducción de 20 a 10%, por lo contrario el modelo GFDL predice un aumento del 10 al 30% (Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez, 1998). Lo anterior traería consigo una reducción de las áreas forestales en el norte del país (Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez, 2000). Gómez-Díaz y colaboradores (2007), publicaron el estudio del comportamiento de la vegetación de la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán en Hidalgo, bajo escenarios de cambio climático, por medio del uso del modelo GFDL y HADCM3 para los horizontes 2020 y 2050, cuyos resultados fueron incrementos del 57.1% y 62.4% de las zonas áridas con el modelo HADCM3 y del 24.2 al 23.9% con el modelo GFDL, lo que refleja una disminución del 23% de las zonas boscosas.

Por otra parte el empleo de modelos regionales en México muchas veces sólo se ha realizado para conocer la variación climática de un lugar (Pérez, 2001) o para pronósticos del tiempo (CCA, 2009; SMN, 2009; UDG ,2009), debido a que la generación de escenarios climáticos requiere de ajustes en la configuración de los modelos, lo que exige conocimientos de programación del software a emplear, tiempo de experimentación y hardware compatible.

Los modelos regionales frecuentemente utilizados en México son el MM5 y el WRF (modelo de Investigación y Predicción del Tiempo, por sus siglas en inglés). Ambos modelos han sido desarrollados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), los Centros Nacionales para la Investigación Atmosférica (NCAR), y los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP) entre otras instituciones (WRF, 2009).

En cuanto a los modelos ecológicos de distribución de especies, se han elaborado diversos trabajos como el de Rosas (2008), quien mediante el programa de cómputo BIOCLIM (Busby, 1991) determinó la ecogeografía del género *Pinus* en la subcuenca de Tehuantepec. También Ortega-Huerta y Peterson (2008) compararon seis métodos diferentes de modelación de nichos y distribución de especies.

Además de estos trabajos, en la Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Villers-Ruiz y colaboradores, realizaron un análisis de cómo se verán afectadas las zonas bioclimáticas y la biodiversidad de México bajo los escenarios A2 y B2 para el año 2050, modelados con ECHAM5, HadGEM1 y GFDL. Cabe destacar que el modelado de los nichos ecológicos fue realizado mediante MaxEnt, obteniéndose las probabilidades de presencia de las especies estudiadas (Villers-Ruiz *et al.*, 2009).

2.2. Marco teórico

2.2.1. El clima y su relación con la biota

La Tierra ha asombrado al ser humano tanto como el Universo mismo, el cielo, los océanos y los continentes que en ella existen, por lo que han sido observados, explorados e investigados por la humanidad desde sus inicios. Describiendo y tratando de dar una explicación a cada cosa que existe, formulando leyes y teorías, simulando cada fenómeno mediante experimentos, desde lo más sencillo hasta lo más difícil,

investigando desde las partículas más pequeñas hasta los compuestos más complejos (Peralta-Fabi, 2000).

Pero ¿qué es el clima?, casi siempre está definido como el promedio de varios estados de tiempo medidos durante muchos años, cuyas principales variables son la temperatura y la precipitación y los factores que lo determinan: la altitud, la latitud, el relieve y la distribución de tierras y aguas (Conde, 2007). Por lo cual al clima se le puede entender, como un patrón de diferentes variables, presentes durante un largo período de tiempo, cuyas proporciones en las que se encuentren cada una de estas variables hacen posible identificar diferentes grupos de climas. La definición se puede ampliar un poco más, si se tienen algunos conocimientos básicos sobre los principales objetos de estudio del clima, los cuales son: la atmósfera, el océano, la capa de hielo, nieve, la litosfera y la biosfera (Ocampo y García, 2007).

Las proporciones de los gases que conforman la atmósfera han variado y no siempre han sido las mismas, por lo cual hoy se sabe que la Tierra contó alguna vez con una atmósfera reductora (Seinfeld y Pandis, 2006; Wallace y Hobbs, 2006). Ahora la proporción de los fluidos es la siguiente: 78% de nitrógeno (N_2), 21 % de oxígeno (O_2), 1% de argón (Ar) y en menor proporción oligocompuestos, cuyas cantidades oscilan entre 10^{-6} y 10^{-12} partes por millón (ppm), (Seinfeld y Pandis, 2006; Wallace y Hobbs, 2006).

La constitución actual de la atmósfera la hace ser rica en oxígeno, cuya evolución todavía no es del todo clara, aunque la transformación de una atmósfera reductora a oxidante, se asocia a la fotosíntesis de las cianobacterias y arqueobacterias, las cuales contribuyeron al incremento del oxígeno atmosférico (Seinfeld y Pandis, 2006). De esta forma, desde los inicios de la vida, se estableció una relación entre la vida y el ambiente, en donde los organismos responden a los procesos físicos y químicos que se dan en la naturaleza mediante diferentes procesos evolutivos como la selección natural (Kasting y Siefert, 2002; Dismukes *et al.*, 2001; Darwin, 1995). Ejemplo de ello es la renovación del O_2 por medio de la fotosíntesis, la cual si no existiera, la cantidad de

oxígeno disminuiría menos del 1% en 4 millones de años por la oxidación presente en las rocas sedimentarias o en 20 años de existir grandes reservas de carbón orgánico en la superficie (Seinfeld y Pandis, 2006).

En el caso del nitrógeno, las bacterias fijadoras de nitrógeno se encargan de regular una cierta parte de la cantidad de este gas, mediante su metabolismo. La situación del vapor de agua es muy interesante, ya que su cantidad varía en el tiempo y el espacio, por lo que en los trópicos puede alcanzar una proporción del 4% de los gases presentes en la atmósfera, mientras que en los polos su presencia es de menos del 1%, puesto que el agua se encuentra en estado sólido (Ahrens, 2001). Por lo tanto, el vapor de agua depende del ciclo hidrológico del sitio, en el cual la vegetación también tiene influencia. Por ejemplo, Henderson-Sellers y McGuffie (1990) en su libro "Introducción a los modelos climáticos" mencionan que la deforestación en el Amazonas, modificó considerablemente el ciclo hidrológico aumentando la temperatura en las zonas deforestadas y disminuyendo la humedad. También la desertificación de las áreas con cualquier tipo de vegetación, puede provocar que el almacenamiento de agua disminuya, debido a un aumento de la escorrentía superficial y un incremento del albedo (relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente), presentándose una elevación en la temperatura dado que al existir menor humedad, el flujo de calor latente disminuye y por tanto la temperatura es mayor (Henderson-Sellers y McGuffie, 1990).

El caso del dióxido de carbono (CO_2) es bien conocido, puesto que es uno de los principales gases de efecto invernadero y sus concentraciones han tenido un fuerte aumento desde la revolución industrial (Robinson *et al.*, 2007), ya que en tiempos de Shakespeare y de su contemporáneo Cervantes (siglo XVI), su concentración era de 80 ppm (Socolow, 2005). Se estima que las cantidades actualmente de CO_2 son de 380 ppm a 105 Km de altitud (Wallace y Hobbs, 2006), aunque los estudios realizados por el IPCC reportan que las cantidades antropogénicas de CO_2 acumuladas entre 1991 y 2010 varían entre 630-1410 GtC (gigatoneladas de Carbono), por tanto sus niveles de estabilización estarían por arriba de las 450 ppmv, modificando notablemente la cantidad estimada en la mayoría de la literatura (IPCC, 1997). La regulación y la

dinámica del dióxido de carbono se explican mediante el denominado ciclo del carbono, donde la biota participa activamente debido a la intervención de dos procesos fisiológicos: la fotosíntesis realizada por las plantas, las algas y algunas bacterias; y la respiración, proceso realizado por todos los organismos aeróbicos, cuyo aceptor final de electrones es el oxígeno. Dichos procesos son antagónicos, por tanto mientras que en el primero, los productos finales son $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$, en el segundo son $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (Álvarez-Borrego, 2007; Wallace y Hobbs, 2006).

La relación de la vegetación con el clima es posible corroborarla con la historia del sistema terrestre, donde la biosfera ha jugado un papel muy importante, dando pie a los diferentes cambios climáticos no antropogénicos registrados y a la regulación micro y mesoclimática (Jackson *et al.*, 2008; Arellano y De Las Rivas, 2006; Beerling *et al.*, 1998). Como primer ejemplo, se puede mencionar la conquista del medio terrestre por las plantas, lo cual ocurrió hace 505 millones de años aproximadamente. Ya en el Silúrico (414 millones de años) se tenían establecidos ecosistemas terrestres donde plantas y animales interactuaban, así también uno de los primeros géneros de plantas que aparecieron en este período son *Cooksonia* (Valencia *et al.*, 2004).

La presencia de organismos en la superficie terrestre trajo consigo un cambio en las condiciones ambientales, formando el microclima para el desarrollo de diferentes formas de vida (Valencia *et al.*, 2004). Por tanto, para que las plantas habitaran el medio terrestre, hubo grandes cambios en la Tierra como el aumento de oxígeno, relacionado con la menor incidencia de los rayos ultravioleta en la superficie y la producción del oxígeno por organismos marinos, dando pie a la formación de la capa de ozono, lo que permitió que los rayos de onda corta no dañarán a las primeras formas de vida (Valencia *et al.*, 2004). Además del desarrollo de una atmósfera oxidante, los niveles de CO_2 eran dieciocho veces mayores que ahora, por lo cual las lluvias eran más ácidas intensificando la desintegración de las rocas, contribuyendo de ésta manera a la formación del suelo requerido por muchas plantas y animales (Valencia *et al.*, 2004). A finales del Devónico (359 millones de años) y principios del Carbonífero, las condiciones se invirtieron, el oxígeno empezó a aumentar mientras que las

concentraciones de dióxido de carbono disminuyeron, lo que se pudo deber a la interacción entre la biosfera y el ciclo del carbono, provocando que las plantas desarrollaran formas alternativas para solventar el exceso de oxígeno, el cual perjudicó directamente la capacidad fotosintética y limitó la producción primaria (Beerling *et al.*, 1998).

Por tanto, los ecosistemas cuentan con mecanismos de retroalimentación donde el clima influye en la vegetación y viceversa, aunque la magnitud en la que actúa cada agente (clima o vegetación) no es la misma. De hecho en el Holoceno medio, se piensa que ocurrió un cambio del albedo terrestre debido a la retroalimentación entre la atmósfera y la vegetación, lo que contribuyó a un calentamiento global en dicha época (Ganopolski *et al.*, 1998). En las diferentes evidencias paleoclimáticas, se sabe que la distribución de los climas en la Tierra no siempre ha sido la misma y por lo cual los diferentes tipos de vegetación han ocupado diferentes áreas geográficas, ya que la distribución de cualquier tipo de vegetación se debe a las condiciones climáticas presentes en una cierta región (Rzedowski, 2006).

La importancia de la vegetación en el sistema climático, ha hecho que su conservación sea una herramienta clave para mitigar los efectos del cambio climático (Canadell y Raupach, 2008), aunque las respuestas de cada tipo de vegetación frente al cambio climático son diferentes, puesto que algunos son más vulnerables que otros (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 2000), así como su influencia en los diversos sistemas de retroalimentación del clima no son los mismos (Henderson-Sellers y McGuffie, 1990).

2.2.2. Los bosques templados de México

El territorio mexicano presenta diferentes tipos de climas, los cuales determinan la distribución de la vegetación de México. La correlación entre ambos agentes, no es fácil de explicar, ya que en el país los factores ambientales interactúan entre sí, dando efectos sinérgicos ó antagónicos. Por lo cual y a pesar de que el clima se tome como el principal factor determinante de la vegetación, se tiene que tomar en cuenta la

interacción del mismo sobre otros factores determinantes de la vegetación como son el suelo y la topografía (Rzedowski, 2006).

Al no presentarse una correlación clara entre el clima y la vegetación en el país, se ha tenido que recurrir a pruebas geológicas y paleoclimáticas que expliquen por qué se presentan estas anomalías (Rzedowski, 2006). Uno de los elementos que se tienen que tomar en cuenta, es la orogenia de la cual se desarrollaron las diferentes sierras, mesetas y planicies del país, formando los puentes migratorios por los cuales la vegetación se dispersó y se distribuyó (Sánchez-González, 2008), así como la presencia de gradientes altitudinales propicios para algunos tipos de vegetación y limitantes para otros (Rzedowski, 2006).

Los cambios climáticos en las épocas de glaciaciones (Eoceno tardío, Mioceno medio y tardío, Plioceno tardío y Pleistoceno), propiciaron las condiciones adecuadas para la expansión de la vegetación boreal hacia bajas latitudes y la reducción de la vegetación tropical, mientras que cuando se presentaron aumentos en la temperatura (Paleoceno, Eoceno temprano y medio, Oligoceno, y Mioceno temprano), hubo un enriquecimiento en la flora y fauna tropical de México (González, 1998). También no hay que olvidar que la distribución de tierras y aguas (factor determinante del clima), ha variado a lo largo de la historia geológica de México, lo que trajo consigo modificaciones en las condiciones climáticas, siendo más extremosas durante las emersiones, incrementándose el efecto de continentalidad. Mientras que cuando hubo transgresiones marinas en el territorio, éstas propiciaron el desarrollo de la biota de ambientes salobres y vegetación costera (González, 1998).

Aún con todas las implicaciones climáticas y no climáticas que existen y que afectan el determinismo de la vegetación del país, se cuenta con una clasificación de la vegetación acorde a los diferentes tipos de climas, permitiendo generar una cartografía a nivel nacional en escala 1:250 000 de las comunidades vegetales. Esta clasificación se basa en la obra "Vegetación de México" de Jerzy Rzedowski (2006), en donde se mencionan diez diferentes tipos de vegetación, de las cuales tres de ellas

corresponden a climas templados, el bosque de *Quercus*, el bosque de coníferas y el mixto. Las tres últimas unidades fitogeográficas son parte de las zonas templadas de México cuya superficie es de alrededor de cuarenta y seis millones de hectáreas, cubriendo el 23.4% del territorio nacional y dividiéndose en cuatro regiones fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Oriental y del Sur y el Eje Neovolcánico (González, 2004).

Los bosques de encino, coníferas y mixto se desarrollan principalmente en climas templados y algunos en climas secos. Los bosques de *Quercus*, por lo regular se distribuyen en donde la precipitación anual oscila entre los 350 mm y los 2000 mm con un rango de temperatura media anual que va desde 12°C a los 20°C, mientras que los bosques de coníferas se pueden encontrar en sitios donde la precipitación anual va desde los 600 mm a los 1000 mm y su temperatura media anual oscila entre los 10°C a 20°C. (García, 1981). Los límites altitudinales para estos tipos de vegetación van desde los 800 m.s.n.m. hasta los 4000 m.s.n.m., en el caso de las coníferas (González, 2004).

Los bosques de encino se encuentran desde el nivel del mar hasta los 3100 m.s.n.m., siendo más comunes entre los 1200 y los 2800 m.s.n.m., debido a que la temperatura (su principal límite) desciende conforme la altitud aumenta (Rzedowski, 2006). Estos bosques predominan en la Sierra Madre Oriental y ocupan el 5.5% del territorio nacional. Su fisonomía se compone por uno a tres estratos arbóreos de hojas gruesas esclerófilas, uno a dos estratos arbustivos y un estrato herbáceo que varía dependiendo si el bosque es abierto o cerrado. Dichas comunidades vegetales pueden ser cerradas o abiertas y caducifolias o perennifolias (Hernández, 2001). En éste tipo de bosque, los árboles que predominan, pertenecen al género *Quercus*, pero también se presentan algunos otros géneros como son: *Abies*, *Alnus*, *Arbutus*, *Pinus*, *Cupressus* y *Juniperus*. La composición florística que se presenta se encuentra dominada por las plantas pertenecientes a la familia *Compositae*, seguidas por la *Gramineae* (Rzedowski, 2006).

2.2.3. La modelación climática: modelos generales y de área limitada

El modelado del clima ha ido cambiando de acuerdo a los avances tecnológicos, en particular con los recursos computacionales, buscando cada vez un mejor detalle de los procesos climáticos. En la actualidad se pueden clasificar conforme a la escala con la que trabajan, en Modelos Generales y Modelos de Área Limitada (Pérez, 2001; Harvey *et al.*, 1997). Los primeros Modelos Generales sólo eran capaces de resolver las ecuaciones para los fenómenos atmosféricos ó para los oceánicos. La convergencia de modelar ambos fenómenos dio origen a los llamados Modelos de Circulación General Atmosféricos y Oceánicos (MCGAO ó AOGCMs por sus siglas en inglés), donde además se incluyen aspectos relativos al relieve, la criósfera y últimamente se le han añadido la dinámica y comportamiento de los aerosoles y del ciclo del carbono, esto a raíz de tratar de explicar el cambio climático debido a causas antropogénicas (Carter *et al.*, 2007a; Pasini, 2005; Harvey *et al.*, 1997).

Uno de los problemas que tuvieron que resolver los MCGAO fue la diferencia entre las escalas de los fenómenos atmosféricos y oceánicos. Los primeros eran modelados por lo general con una cuadrícula de 250 Km en la horizontal por 1 Km en la vertical, mientras que los modelos oceánicos tenían una resolución entre 125 a 250 Km en la horizontal por 200 a 400m vertical (Gutiérrez y Pons, 2006; Pasini, 2005).

Cuando fue resuelta la diferencia entre las escalas, se obtuvieron los actuales Modelos Climáticos Globales (MCG) con mallas de 150-250 Km por 150-600 Km (Pinto *et al.*, 2008; Carter *et al.*, 2007a) y de 6 hasta 50 niveles atmosféricos en la vertical (Magaña *et al.*, 2000). Dentro de los MCGAO más utilizados se encuentran 23 modelos desarrollados por diferentes países y aplicados a los estudios de cambio climático del IPCC (Cuadro 1).

Aún con la solución de las ecuaciones atmosféricas-oceánicas por parte de los MCGAO, muchos de los fenómenos a escalas menores eran muy difíciles de explicar, ya que exigían muchos recursos computacionales o de nuevas técnicas para obtener la

resolución deseada. Por lo que se tuvieron dos maneras diferentes de resolver el problema: 1) desarrollar modelos regionales o de área limitada MCR (RCM o LAM por sus siglas en inglés), que utilizarán las salidas de los MCGAO (método físico-dinámico); y 2) métodos estadísticos que relacionarán los patrones de gran escala con patrones de mesoescala (Schoof *et al.*, 2009; Conde *et al.*, 2008b).

Ambas técnicas son conocidas como *downscaling*² (reducción de escala) y los procesos de validación dependerán de que *downscaling* se elija: dinámico o estadístico (Schoof *et al.*, 2009; Rummukainen, 2010; Tejada-Martínez *et al.*, 2008). El método dinámico ocupa las salidas de los MCGA y los prueba en un modelo regional de alta resolución del clima actual, comparándolos con los datos meteorológicos observados en las últimas décadas (Schoof *et al.*, 2009; Castro, 2007).

Cuadro 1. Seis de los 23 modelos más utilizados para el modelado climático a gran escala

Modelo	Resolución para el modelado	
	atmosférico/oceánico (expresado en grados)	País de origen
BCC-CM1	1.9° X 1.9° / 1.9° X 1.9°	China
CCSM3	1.4° X 1.4° / 0.3° - 1° X 1°	Estados Unidos de América
CGCM3.1	~2.8° X 2.8° / 1.9° X 1.9°	Canadá
CSIRO-MK3.0	~1.9° X 1.9° / 0.8° X 1.9°	Australia
ECHAM5/MPI-OM	~1.9° X 1.9° / ~3.9° X 3.9°	Alemania
GFDL-CM2.0	2.0° X 2.5° / 0.3°-1.0° X 1.0°	Estados Unidos de América

Modificado de Randall *et al.*, 2007; Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI), 2007.

Mientras que en los métodos estadísticos se seleccionan unas cuantas variables (predictandos) de una cantidad de predictores atmosféricos y oceánicos (Schoof *et al.*, 2009; Pasini, 2005). Los predictandos más utilizados son la precipitación y la temperatura, por ser los más accesibles, ya que a nivel mundial son los datos más medidos por la importancia que tienen (Conde *et al.*, 2008b; Pasini, 2005). Una vez

² *Downscaling*, se le denomina al método de reducción de la escala de la malla de puntos utilizada en los modelos globales (MCGAO), a una de menor tamaño empleada en los modelos regionales. También es conocido como regionalización (Carter *et al.*, 2007a).

determinados, la validación del modelo se hace mediante regresión lineal u otros métodos estadísticos, en donde los predictandos modelados para la línea base o escenario base, tienen que caer dentro de los valores observados (Pasini, 2005). La ventaja de éste método es que puede resolver relaciones entre los diferentes factores ambientales a escala regional que muchos modelos regionales no hacen, aunque se debe suponer que la relación entre los predictores y predictandos es momentánea (Schoof *et al.*, 2009).

En cuanto a los MRC algunos de ellos son: el *Canada Regional Climate Model* (CCCma, 2009), el *Regional Atmospheric Modeling System* (ATMET, 2009), el *Cosmo Model* (JRC-CCU, 2009), el MM5 (Pérez, 2001) y el *Weather Research and Forecasting* (WRF, 2009). Las limitaciones de estos modelos están estrechamente ligadas a las fallas o sesgos sistemáticos de los MCGAO y la calidad de los datos, ya que muchos de los datos de las condiciones de frontera que utilizan los MRC, provienen de los análisis de meteorología global, sólo que a diferencia de los MCGAO, la simulación que llevan a cabo puede hacer que no existan o no en cierto grado los sesgos sistemáticos (Rummukainen, 2010), así como los modelos regionales están limitados a la escala temporal y espacial para la que fueron diseñados (Pérez, 2001). La principal ventaja es la alta resolución del modelado, puesto que pueden simular la dinámica climática de pequeñas áreas, lagos, ríos y montañas, modelando la circulación regional de la precipitación y cambios en la temperatura (Rummukainen, 2010; Pérez, 2001).

Además de los *downscaling* dinámico y estadístico, se ha tomado en cuenta la interpolación como método de reducción a escala, obteniendo una resolución adecuada para la modelación regional. La interpolación es el cálculo de valores, dentro de un intervalo en el que los valores extremos se conocen (Stewart, 2001). Existen diferentes tipos de interpolaciones siendo la más sencilla la interpolación lineal cuya ecuación es:

$$y-y_0 = [(y_1-y_0)/(x_1-x_0)](x-x_0)$$

Mientras que la más utilizada para los modelos climáticos es la interpolación segmentaria (interpolación por *splines*³), la cual emplea segmentos de diferentes polinomios para calcular una función. Debido a la complejidad matemática de este tipo de interpolación, el cálculo se hace mediante programas de cálculo, como el ANUSPLIN descrito por Hutchinson (1995) y utilizado en la metodología propuesta por Hijmans *et al.* (2005) para la interpolación como una técnica de reducción de escala (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2010; Conde *et al.*, 2008a).

2.2.4. Escenarios climáticos

Los escenarios climáticos son uno de los productos obtenidos con los modelos climáticos, los cuales independientemente de la metodología de reducción climática, dan una imagen de cómo sería el clima en el futuro de acuerdo a las condiciones o cambios conocidos en el presente. En ellos se incluyen características socioeconómicas futuras, que determinan los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a las actividades humanas (Tejada-Martínez *et al.*, 2008; Carter *et al.*, 2007a; Carter *et al.*, 2007b).

Los datos socioeconómicos y su relación con las emisiones de los GEI (gases de efecto invernadero), son tomados de los escenarios de emisiones realizados y propuestos por el IPCC. De acuerdo a lo anterior se establecieron cuatro familias de escenarios, las cuales son las principales líneas evolutivas hasta ahora propuestas por el IPCC y se muestran en la Figura 1. A diferencia de las demás familias de escenarios, la familia de escenarios A1 se divide en tres diferentes grupos: A1FI, el cual hace uso intensivo de los combustibles fósiles; A1T, mayor tecnología en el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía; y A1B, en donde se utilizan todas las fuentes de energía en proporciones iguales (Carter *et al.*, 2007a; IPCC, 2000).

³ El concepto *splines* deriva del inglés que significa ranurar o bosquejo, referido en matemáticas para las funciones desarrolladas mediante la división de los intervalos a los que se quiere aproximar y la construcción de polinomios en cada uno de los subintervalos (Flores, 2004).

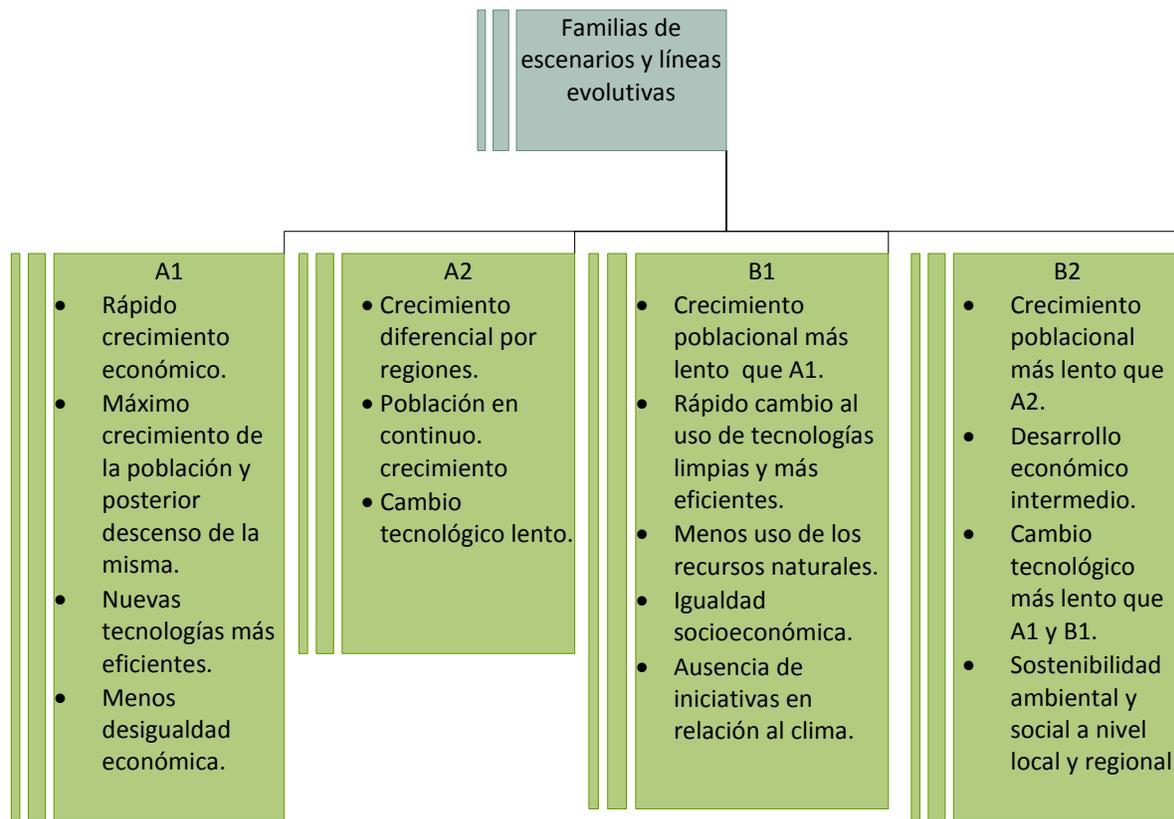


Figura 1. Principales familias de escenarios y líneas evolutivas donde se establecen las características socioeconómicas futuras. Modificado de IPCC, 2000.

Los escenarios climáticos que se desarrollan tienen que cumplir con los diferentes criterios establecidos por el IPCC (Cuadro 2). Además de estos criterios se debe realizar un escenario base, cuyos datos climatológicos sean de al menos 30 años atrás, de forma que sean representativos de las condiciones climáticas actuales (Carter *et al.*, 2007a; Magaña *et al.*, 2000); así como se deben de buscar modelos climáticos capaces de obtener mejor resolución para que la simulación sea lo más realista posible. Dicha resolución se divide en dos: espacial o temporal, siendo la primera el espacio entre los puntos de la rejilla, la cual se mide en kilómetros o en grados (Harvey *et al.*, 1997) y sirve como medida del detalle de un modelo, similar a los píxeles de una fotografía (Reader, 2007).

Cuadro 2. Características de los escenarios climáticos

Característica	Definición
Consistencia con las proyecciones globales	Los escenarios deben ser coherentes con las proyecciones del calentamiento global basadas en los incrementos de las emisiones de los GEI.
Plausibilidad física	No deben violar las leyes de la física.
Información adecuada para las evaluaciones de impacto	Deben contener los horizontes, variables y resoluciones apropiadas.
Representatividad	Deben representar adecuadamente el rango potencial del futuro cambio climático regional.
Accesibilidad	Deben ser fáciles de entender, aplicar y obtener.

Modificado de Carter *et al.*, 2007a.

La resolución temporal se refiere a las medidas estacionales, anuales, mensuales o diarias, las cuales dependen del enfoque del estudio, siendo óptimos los largos períodos de tiempo para los estudios relacionados con la distribución de la vegetación (Carter *et al.*, 2007a).

2.2.5. Modelos ECHAM5 y HadGEM1

Los escenarios climáticos que se utilizan en el presente trabajo son el A2 y el B2, los cuales han sido desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera mediante el empleo de los modelos dinámicos ECHAM5 y HadGEM1, creados por el Instituto de Meteorología Max Planck (Alemania) y el *Met Office Hadley Centre* (Inglaterra), respectivamente (PCMDI, 2007). El modelo ECHAM5 es un MCGAO con una resolución de 1.9°x1.9° y 31 niveles en la vertical, la versión cinco cuenta con mejoras en los procesos de la superficie como la radiación de la vegetación y el albedo; también desarrolla las ecuaciones correspondientes para representar la nieve sobre los bosques, la dinámica oceánica y atmosférica, la orografía, la radiación, el efecto

snowball, la microfísica de las nubes, la nubosidad y los gases de efecto invernadero y oligoelementos (Roeckner *et al.*, 2003).

Mientras que el modelo HadGEM1 tiene una resolución para el modelado atmosférico de $1.25^{\circ} \times 1.9^{\circ}$ en la horizontal y 38 capas en la vertical; así como puede modelar las condiciones oceánicas con una resolución de $0.3^{\circ} - 1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ con 40 niveles de profundidad. La matemática del modelo es por métodos semi- implícito y semi-Lagrange (Johns *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2006; Stott *et al.*, 2006). La modelación que realiza incluye las emisiones de gases de efecto invernadero, aunque excluye el polvo mineral (suspensión de los minerales del suelo). En concreto el modelo puede simular lo siguiente: la orografía, la hidrología, la nubosidad, los ríos, los aerosoles, la dinámica oceánica, la física y dinámica atmosférica, la radiación, la convección y flujo de masa, parámetros del suelo, la microfísica de las nubes, la vegetación y el hielo marino (Johns *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2006; Stott *et al.*, 2006).

2.2.6. El nicho ecológico y los modelos de distribución de especies

Las relaciones de las variables bióticas y abióticas (por ejemplo climáticas) son explicadas mediante los diversos modelos de nicho ecológico, cuyo concepto más utilizado es el definido por Hutchinson en 1957, quien propuso el nicho como una respuesta multidimensional de factores abióticos y bióticos presentes en el ambiente (Del Socorro, 2009; Rosas, 2008; Milesi y López, 2005; Harmon *et al.*, 2005; Hutchinson, 1957).

Otra definición es la propuesta por Elton (1927), quien lo define como la posición que juega un organismo en el ecosistema. Por tanto y con lo establecido por Hutchinson, una especie S_i tiene un hipervolumen N_i compuesto por diferentes variables x_i en n -dimensiones, donde puede mantener una población (Hutchinson, 1957).

Los modelos de nicho ecológico al solucionar diferentes problemas ecológicos y biogeográficos, sirven como base para los modelos de distribución de especies (Ortega-Huerta y Peterson, 2008; Illoldi-Rangel y Escalante, 2008). La distribución geográfica de las especies se debe a la relación entre la ecología de las especies y sus historias evolutivas, determinadas por factores abióticos, bióticos, regiones accesibles para la dispersión y la capacidad evolutiva de cada especie (Benito, 2009; Trotta *et al.*, 2008; Guisan y Zimmermann, 2000; Soberón y Peterson, 2005). Dentro de los gradientes abióticos para las plantas se tienen tres subconjuntos, los directos (por ejemplo el pH y la temperatura), los indirectos (ej. elevación y orientación) y los de recursos (ej. agua, minerales, luz solar), (Benito, 2009; Benito y Peñas, 2007; Guisan y Zimmermann, 2000; Austin, 1980). La complejidad de incorporación de todas las variantes para la determinación de la distribución de una especie, ha llevado a que se desarrollaran diferentes algoritmos matemáticos que puedan modelar con mejor precisión el nicho ecológico (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008; Lobo y Hortal, 2003). El resultado de las relaciones entre la especie y las variables ambientales, modeladas por una construcción numérica y expresadas en un espacio geográfico es a lo que se le denomina modelo de distribución (Benito, 2009).

Para la elaboración de los modelos de distribución se han utilizado diferentes algoritmos como: la regresión logística (Austin, 1980), GLM (Generalized Linear Models; Austin *et al.*, 1984; Nicholls, 1989), GAM (General Additive Models; Yee y Mitchell, 1991), MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines; Leathwick *et al.*, 2006; Friedman, 1991), Bioclim (Busby, 1991), Domain (Carpenter *et al.*, 1993), ENFA (Hirzel, *et al.*, 2002), GARP (Peters y Stockwell, 1999), MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) y las redes neuronales, entre muchos otros. En el caso de los algoritmos GLM, GAM, MARS y las redes neuronales, hacen uso de registros de presencia y ausencia de una especie, así como uso de regresiones múltiples, mientras que los demás hacen uso sólo de registros de presencia (Cuadro 3), (Benito, 2009; Rosas, 2008).

Cuadro 3. Principales algoritmos utilizados para el modelado de la distribución de especies

Algoritmo	Registros de presencia	Registros de ausencia	Examinación de causa-efecto	Método/ecuación/distribución que utiliza
Redes neuronales	X	X		Redes neuronales multicapa. Múltiples reglas iterativas.
GLM	X	X	X	Gaussiana, binomial, Poisson, Gamma.
GAM	X	X	X	
MARS	X	X	X	Regresión por polinomios segmentados.
Regresión logística	X	X	X	Regresión logística.
BIOCLIM	X		X	Utiliza una envoltura climática, donde la distribución de las variables climáticas es normal.
DOMAIN	X		X	Distancias ecológicas (similaridad), distancia de Gower.
ENFA	X		X	Utiliza un análisis de componentes. No acepta valores cualitativos.
GARP	X		X	Sistema de inteligencia artificial que utiliza correlaciones no aleatorias entre los puntos de presencia y las variables climáticas.
MaxEnt	X		X	Sistema de inteligencia artificial que hace uso del principio de máxima entropía.

Fuente: Benito, 2009; Rosas, 2008; Illoldi-Rangel y Escalante, 2008; Benito y Peñas, 2007.

2.2.7. MaxEnt

MaxEnt es un algoritmo que utiliza la máxima entropía para crear una distribución de las especies en función de diferentes variables (climáticas, topográfica, edáficas entre otras), esto quiere decir que entre todas las distribuciones que se generan se elige la más uniforme, mediante la asignación de una probabilidad a cada uno de los puntos de un conjunto de valores de una distribución, calculando de ésta forma su entropía (ecuación 1), (Benito, 2009; Longoria, 2008; Phillips *et al.*, 2006).

Ecuación 1.
$$H(p)=-\sum p(x)\ln p(x), x\in X$$

MaxEnt sólo utiliza datos de presencia, lo que facilita los trabajos con los registros incompletos de las especies. Así como puede manejar variables continuas y categóricas. La validación de MaxEnt se hace mediante el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés), la cual se basa en una matriz de confusión (Cuadro 4). Para la AUC, MaxEnt determina un umbral con el que genera una tasa de omisión⁴. De ésta forma traza una curva con la que se discrimina si la distribución predicha es mejor que el azar (por arriba de la curva) o no (por debajo), (Benito, 2009; Longoria, 2008; Phillips *et al.*, 2006). Con lo anterior también se puede hacer un umbral de evaluación independiente, porque al igual que las matrices de confusión, una vez teniendo los errores por omisión y comisión⁵ se puede calcular la sensibilidad (errores por omisión) y la especificidad (errores por comisión). MaxEnt puede trabajar sin datos de ausencia porque genera datos de pseudo-ausencia que utiliza para los análisis antes mencionados (Phillips *et al.*, 2006).

El umbral sirve para transformar el mapa de las probabilidades de ocurrencia (resultado de la distribución con máxima entropía) a un mapa de distribución potencial para una especie. También el modelo proyecta un mapa en el que se pueden ver las áreas, donde existe un mayor efecto de restringir los valores de las variables ambientales al rango de los valores encontrados en el entrenamiento (*clamping*), (Phillips *et al.*, 2006).

Cuadro 4. Matriz de Confusión

Modelo	Muestra	
	Presencia	Ausencia
Presencia	A	D
Ausencia	C	B

Donde **A** son los aciertos de presencia, **D** los de ausencia, **C** el error de omisión y **B** el error de comisión.

Fuente: Benito, 2009.

⁴ Omisión: Pronosticar ausencias en los sitios donde existe presencia (Benito, 2009; Rosas, 2008).

⁵ Comisión: Pronosticar presencia en donde la especie no está (Benito, 2009; Rosas, 2008).

3. Objetivo general

Determinar la distribución potencial de los bosques templados de Coahuila bajo los escenarios A2 y B2 generados por ECHAM5 y HADGEM1.

3.1. *Objetivos particulares*

- a) Desarrollar un modelo de máxima entropía para los bosques templados de Coahuila.
- b) Generar mapas de la distribución potencial de los bosques templados.
- c) Observar los efectos del cambio climático en los bosques templados del estado.

4. Hipótesis

Ha: Si las condiciones estacionales de temperatura y precipitación determinan la distribución actual de los bosques templados, entonces las anomalías de temperatura y precipitación propuestas en los escenarios climáticos A2 y B2 modifican la distribución de los bosques templados de Coahuila.

Ho: No existen diferencias significativas entre las distribuciones actuales y futuras de los bosques templados a causa de las variaciones climáticas propuestas en los escenarios climáticos A2 y B2.

5. Zona de estudio

5.1. Ubicación geográfica y fisiografía

Las coordenadas limítrofes del estado Coahuila son: 29° 53' Norte, 24° 32' Sur, 99° 51' Este y 103° 58' Oeste. Representa el 7.7% del territorio nacional y cuenta con 38 municipios. Su principal elevación es el Cerro el Morro con una altitud de 3710 m.s.n.m. La fisiografía de Coahuila se compone por tres provincias geográficas, las Sierras y Llanuras del Norte (17.2% del territorio), la Sierra Madre Oriental (65.69%) y las Grandes Llanuras de Norteamérica (17%), (INEGI, 2007).

5.2. Geología

En la mayor parte del estado de Coahuila las rocas sedimentarias, marinas y continentales son el principal componente geológico y datan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario, siendo las más comunes las calizas del Mesozoico. También algunas regiones del estado cuentan con rocas ígneas del Triásico y el Cuaternario (INEGI, 2007; Villarreal, 2001)

5.3. Clima

El clima que predomina es el muy seco semicálido (BWh), ya que cubre el 47.37% del estado. También cuenta con otros climas como son: templado subhúmedo con lluvias en verano C(w); templado subhúmedo con lluvias escasas todo el año (Cx); semifrío subhúmedo con lluvias escasas todo el año (C(E)x); semiseco semicálido (BS1h); semiseco templado (BS1k); seco muy cálido (BS(h')); seco semicálido (BSh); seco templado (BSk); muy seco muy cálido (BW(h')); muy seco templado (BWk); y semicálido subhúmedo con lluvias en verano (Acw). Los climas templados ocurren en las partes altas de la sierra, ya que la precipitación en general para todo el estado es escasa durante gran parte del año, así como sus altas temperaturas y baja humedad atmosférica (INEGI, 2007; Villarreal, 2001).

5.4. Vegetación

Los tipos de vegetación que se presentan son: bosque mixto, bosque de coníferas, bosque de encino, bosque de galería, palmar, matorral xerófilo, chaparral y pastizal (INEGI, 2007). El matorral xerófilo es el más predominante, ya que representa el 74.3% de la superficie total del estado, donde se pueden obtener diferentes productos forestales no maderables, como: nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller), hojásén (*Flourensia cernua* D. C.), sotol (*Dasyllirion spp.* Zucc.) , ocotillo [(*Gochnatia hypoleuca* (D. C.) A. Gray] y guajillo (*Acacia berlandieri* Benth), (INEGI, 2007).

Mientras que los bosques templados cubren el 3% del estado (INEGI, 2007), de los cuales una parte se encuentran en la región norte de Coahuila, en la sierra de Santa Rosa (Hernández, 2001), donde se presentan en forma de manchones aislados de encinares abiertos compuestos de árboles como: *Quercus gravesii*, *Pinus cembroides*, *Juniperus pachyphloea*, *Q. hypoleucoides*, *Q. laceyi*, *J. fláccida*, *Q. arizonica*, *Q. sinuata*, *Q. mohriana*, *Arbutus xalapensis* y *Fraxinus cuspidata*. También se tiene conocimiento de encinares al suroeste de Piedras Negras, los cuales se encuentran rodeados por vegetación xerófila. Por tanto estos bosques son relictos, los cuales quizás presentan manto freático relativamente poco profundo (Miranda y Hernández X citado por Rzedowski, 2006).

En cuanto a los bosques de coníferas, éstos se encuentran desde el nivel del mar hasta los 4.000 m.s.n.m., comúnmente conocido como el límite de la vegetación arbórea (Rzedowski, 2006; González, 2004). Estos bosques por lo común son llamados de acuerdo a la especie con mayor presencia, por tanto existen bosques de oyamel (*Abies religiosa*), pino (*Pinus*), mixtos y enebro (*Juniperus*), (Rzedowski, 2006).

En Coahuila se tienen registros de bosques con especies piñoneras como *Pinus cembroides*, en zonas transicionales entre la vegetación xerófila y la vegetación un poco más húmeda ubicada entre los 1.500 y los 3.000 m.s.n.m. Así como en las

porciones elevadas de Sierra del Carmen, Sierra de la Madera, Sierra de Parras y Sierra de Arteaga, donde se presentan géneros y especies como *Abies*, *Pseudotsuga*, *Populus*, *Acer*, *P. arizonica*, *P. montezumae*, y no tan frecuentemente *P. teocote*. Entre las especies de *Abies* se tiene que existe *A. duranguensis* var. *coahuilensis*, en Sierra de la Madera y en Sierra de Arteaga (Rzedowski, 2006).

En general Coahuila tiene 41 especies de la división Pinophyta, 88 de Pteridophyta, 2910 de Magnoliophyta (545 de Liliopsida y 2365 de Magnoliopsida), (Villarreal, 2001).

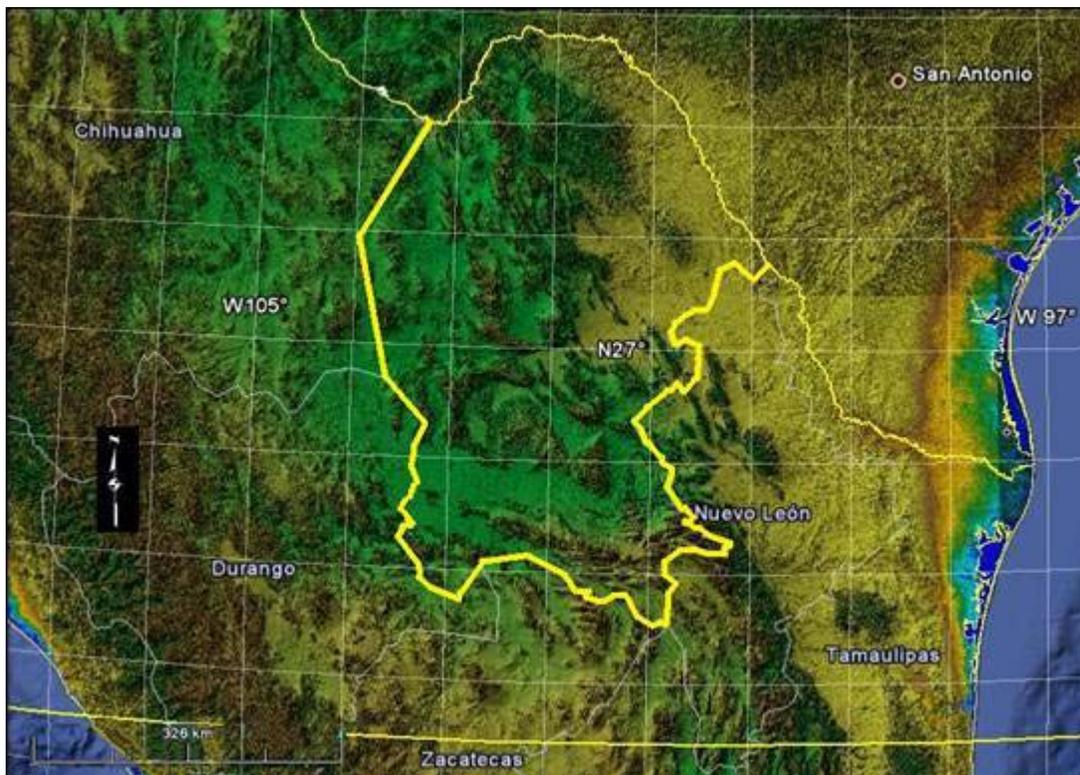


Figura 2. Topografía del estado de Coahuila. Tomado del Modelo digital de elevación del Atlas Climático de México (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2010).

6. Método

El método utilizado fue el siguiente:

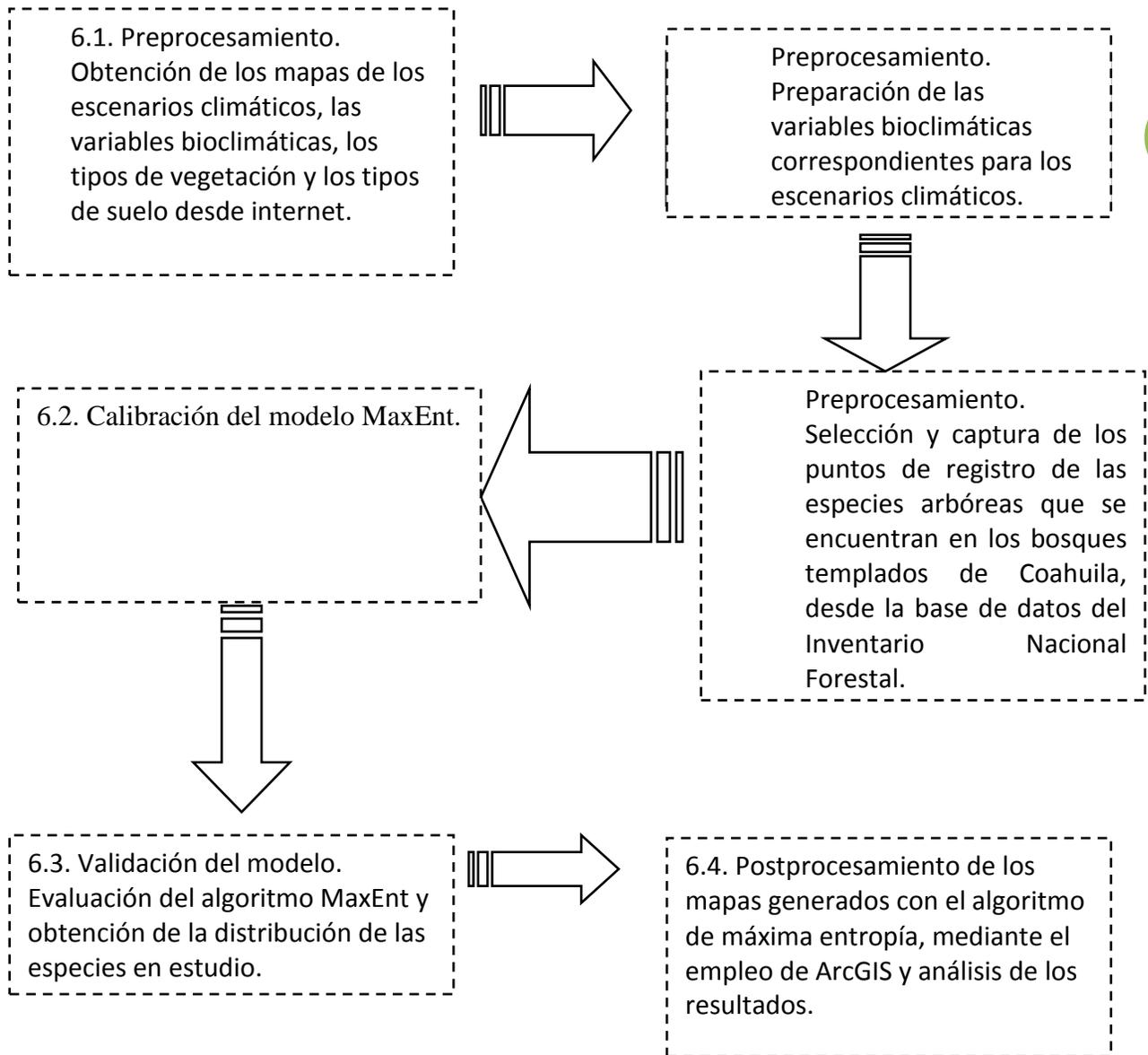


Figura 3. Diagrama de flujo del método empleado para la obtención de los mapas de la distribución potencial de los bosques templados en un futuro, debido al cambio climático.

Descripción detallada de cada uno de las etapas del diagrama de flujo:

6.1. Preprocesamiento

a) Se descargaron los mapas de los escenarios climáticos A2 y B2 correspondientes a la temperatura promedio mensual y la precipitación mensual para los años 2030 y 2050, de los modelos ECHAM5 y HadGEM1 (abreviados en éste trabajo como: E30A2, E30B2, E50A2, E50B2, H30A2, H30B2, H50A2 y H50B2); así como las 19 variables bioclimáticas (Cuadro 5) desde el sitio web <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/servmapas>. Los datos se obtuvieron en formato GeoTiff al seleccionar la opción “bajar datos temáticos”.

b) Una vez obtenidos, los datos se visualizaron al cambiar la extensión de .tiff a .tif, para posteriormente trabajar en ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Los datos ya cuentan con una interpolación para México, la cual se basa en la metodología empleada por Hijmans y colaboradores (2005), dicho método se describe de una forma breve en la Figura 4.



Figura 4. Método a *grosso modo* utilizado por Hijmans *et al.* (2005) para obtener una mayor resolución y reducir la escala.

Cuadro 5. Variables ambientales utilizadas para la distribución potencial de los bosques templados de Coahuila.

Código	Variables bioclimáticas	Código	Variable edáfica*
Tmp	Temperatura media anual	Sue	Tipo de suelo
Esttmp	Estacionalidad de la temperatura	No aplica	
Prpc	Precipitación anual		
Cuartlluvp	Precipitación del cuartil más seco del año		
Cuartsp	Precipitación del cuartil más húmedo del año		
Cuartfp	Precipitación del cuartil más frío del año		
Cuartcp	Precipitación del cuartil más caluroso del año		
Cuartst	Temperatura del cuartil más seco del año		
Cuartlluvt	Temperatura del cuartil más húmedo del año		
Cuartft	Temperatura del cuartil más frío del año		
Cuartct	Temperatura del cuartil más caluroso del año		
Estprcp	Estacionalidad de la precipitación		
Mms	Precipitación del mes más seco del año		
Mmlluv	Precipitación del mes más lluvioso		
Mmtmp	Rango medio diurno (Media mensual (tmáx – tmin)).		
Iso	Isotermalidad. Índice de variabilidad de la temperatura (Mmtmp/Rtmpa).		
Tmpmc	Temperatura máxima del mes más cálido		
Tmpmf	Temperatura máxima del mes más frío		
Rtmpa	Rango de la temperatura anual		

Fuente: WorldClim, 2010; INEGI, 2005*.

- c) En los mapas se cambió el dato -32768 a nulo (figura 5). Así cómo se multiplicó por 0.1, todos los mapas temáticos correspondientes a la temperatura.
- d) Se descargó la cartografía con la división política estatal con escala 1: 250000, de la serie III, desde el sitio <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, en formato *shape* para ESRI (CONABIO, 2008).

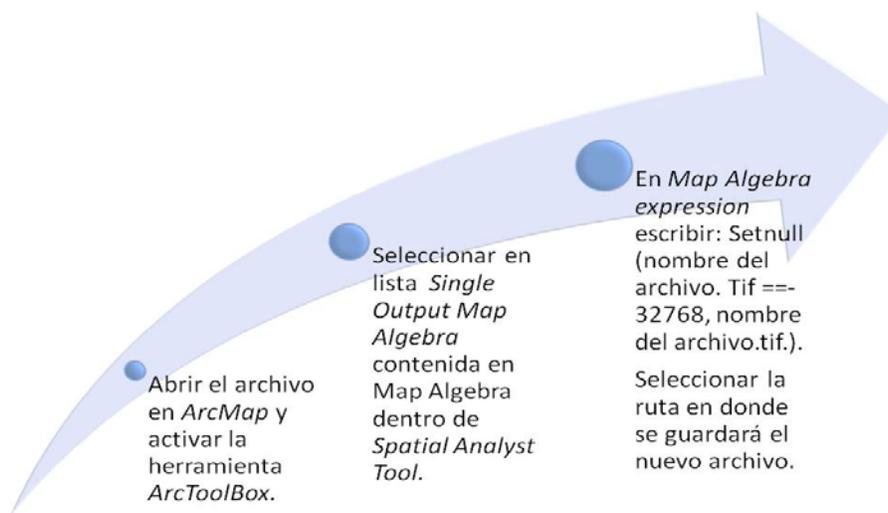


Figura 5. Procedimiento para visualizar los valores contenidos en los archivos descargados del Atlas Climático de forma correcta (CCA, 2010).

e) Desde el sitio de INEGI se descargaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación Serie III y el de Tipo de Suelos en formato *shape* (INEGI, 2005).

f) Se extrajo de todos los mapas sólo la superficie correspondiente a Coahuila, mediante las opciones *Extraction* de las herramientas *Spatial Analysis* y *Analysis*. El datum fue transformado de WGS84 a NAD27, debido a que los datos del Inventario Nacional Forestal, fueron tomados con GSP (sistema de posicionamiento global) calibrado en NAD27.

g) Cada capa se exportó y guardó en formato ASCII para que pudiera ser utilizada en Maxent.

h) Los datos del Inventario Nacional Forestal correspondientes a Coahuila se filtraron, de tal forma que se obtuvieron las coordenadas geográficas con las especies forestales correspondientes a cada punto (Figura 6), (CONAFOR, 2008).

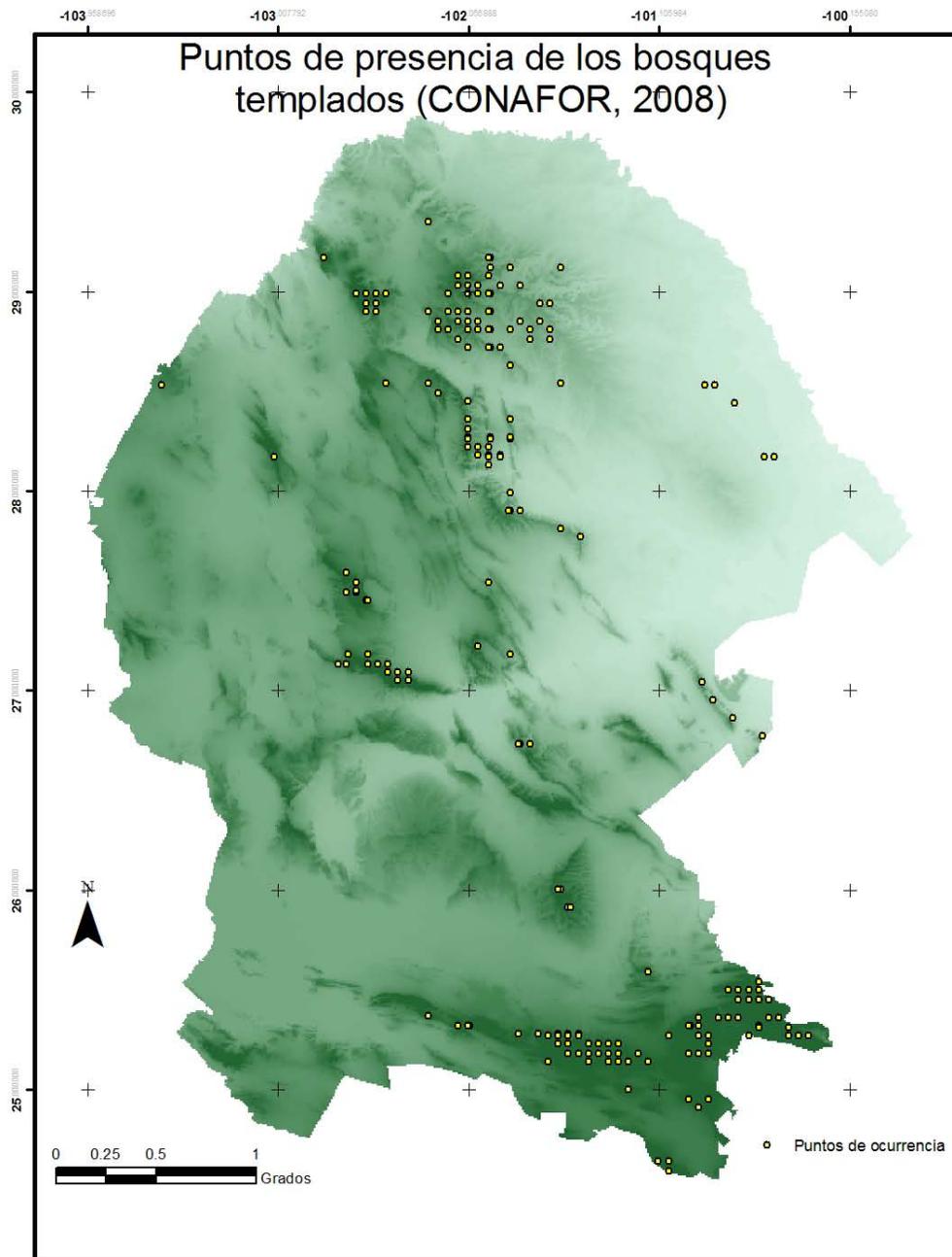


Figura 6. Puntos de presencia de los bosques de Coahuila obtenidos del Inventario Nacional Forestal (CONAFOR, 2008).

i) Las especies georeferenciadas se superpusieron con el mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie III (INEGI, 2005) y sólo se seleccionaron las especies arbóreas que corresponden a los bosques templados: bosque de coníferas, bosque de encino, bosque mixto.

j) Una vez agrupados los datos en bosques templados (1194 datos), se extrajeron aleatoriamente 25% de los registros, que sirvieron como datos de evaluación (*test data*) para MaxEnt y el 75% restante se guardaron como datos de entrenamiento (*training data*). Los archivos se almacenaron en el formato .csv (delimitado por comas), para posteriormente ser ingresados en MaxEnt.

Con los mapas de escenarios climáticos, se generaron las mismas variables bioclimáticas empleadas en el modelo base y se obtuvieron sus coeficientes de correlación de las variables mediante la herramienta *Map Algebra* de ArcGIS, de ésta forma se pudo conocer si existe colinealidad en el modelo o no.

6.2. Calibración del modelo MaxEnt

Los parámetros del modelo fueron los usados por Phillips y colaboradores (2006), los cuales vienen por defecto en el programa: umbral de convergencia = 10^{-5} ; número máximo de iteraciones = 1000; y la regla de corte elegida fue “igual sensibilidad y especificidad del entrenamiento” (Equal training sensitivity and specificity), debido a que éste se genera mediante la curva de ROC, la cual en los modelos no binarios sirve para su evaluación y poder elegir el umbral de forma no subjetiva a diferencia de que se hubiera seleccionado una probabilidad mínima al azar como punto de corte (Liu *et al.*, 2005). El tipo de replicado fue por validación cruzada. Todas las variables se tomaron como continuas, a excepción de la variable “suelos”, la cual fue tomada como categórica, debido a que sólo indica el nombre del tipo de suelo presente.

6.3. Validación del modelo

La evaluación del modelo fue mediante el área bajo la curva (AUC) propuesta y utilizada por varios autores como prueba de la capacidad del modelo para predecir (Benito, 2009; Longoria, 2008; Phillips y Dudík, 2008; Phillips *et al.*, 2006). Ésta prueba utiliza la curva del receptor de características operativas “*receiver operatin charecteristic*” (ROC, por sus siglas en inglés), en donde se gráfica la curva

correspondiente a los valores que se esperarían si la modelación fuera al azar y después se grafican los valores obtenidos con el modelo, de tal forma que se puedan comparar las dos curvas por medio del AUC, dicho índice informa sobre la probabilidad de omisión del modelo y la compara con la obtenida al azar (0.5), siendo mejor, entre más se aproxime a uno o entre más cerca esté de la esquina superior izquierda de la curva de ROC (Benito, 2009; Longoria, 2008; Phillips y Dudík, 2008; Phillips *et al.*, 2006).

La contribución de cada una de las variables se obtiene por medio de la prueba de Jackknife, la cual es una técnica de remuestreo sin remplazo y en aquellos modelos donde existe una alta correlación, los porcentajes de contribución de cada una de las variables se deben interpretar con precaución (Phillips *et al.* citado por Villordo, 2009).

6.4. Postprocesamiento

Una vez obtenidas las probabilidades de ocurrencia y la distribución de los bosques templados para cada escenario, los datos se editaron con ArcGIS de acuerdo a los parámetros del INEGI (proyección cónica de Lambert para México y datum ITRF92) y se calcularon las diferencias entre el área de cobertura potencial actual y la estimada para los años 2030 y 2050, bajo diferentes escenarios climáticos.

7. Resultados

Los resultados de la modelación fueron diferentes mapas de las distribuciones de los bosques templados, de acuerdo a cada uno de los escenarios climáticos utilizados, así como las gráficas correspondientes a la validación del modelo y al análisis de contribución de cada variable. A continuación se presenta la lista de los resultados obtenidos.

- 9 mapas de probabilidades de ocurrencia (actual, E30A2, E30B2, E50A2, E50B2, H30A2, H30B2, H50A2 y H50B2).
- 4 mapas de las distribuciones potenciales (actual, E30A2, E30B2, E50A2, E50B2, H30A2, H30B2, H50A2 y H50B2).
- 1 Gráfica correspondiente a la curva ROC donde se muestra el área bajo la curva.
- 1 Gráfica de la contribución de las variables en el modelo.

7.1. Mapas de probabilidades de ocurrencia

Los mapas de probabilidades de ocurrencia que se presentan a continuación sobre los bosques templados, indican las probabilidades de encontrar los bosques templados de acuerdo a las combinaciones de las variables climáticas que existen en cada uno de los sitios representados en los mapas por píxeles. En ellos se puede observar que en el escenario actual el número de píxeles con probabilidades altas es mayor que en los demás escenarios, así como la mayoría de los escenarios futuros, muestran una distribución espacial de píxeles con probabilidades altas semejante al del escenario actual. Siendo los escenarios H30A2 y H50B2 muy diferentes en cuanto al número y distribución de píxeles con probabilidades de ocurrencia altas (figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (Actual)

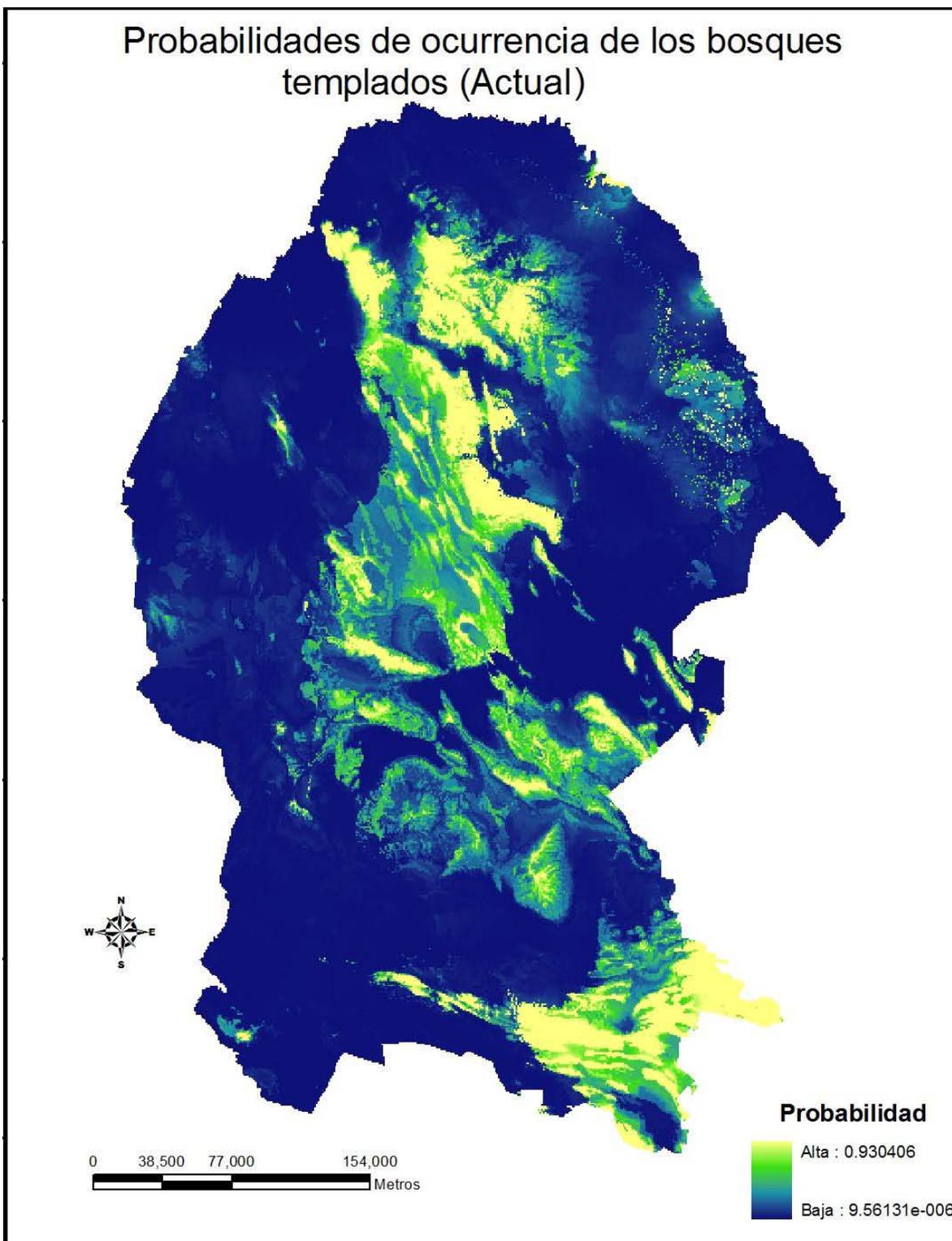


Figura 7. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados actualmente, de acuerdo a las condiciones climáticas que se presentan en cada pixel.

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (E30A2)

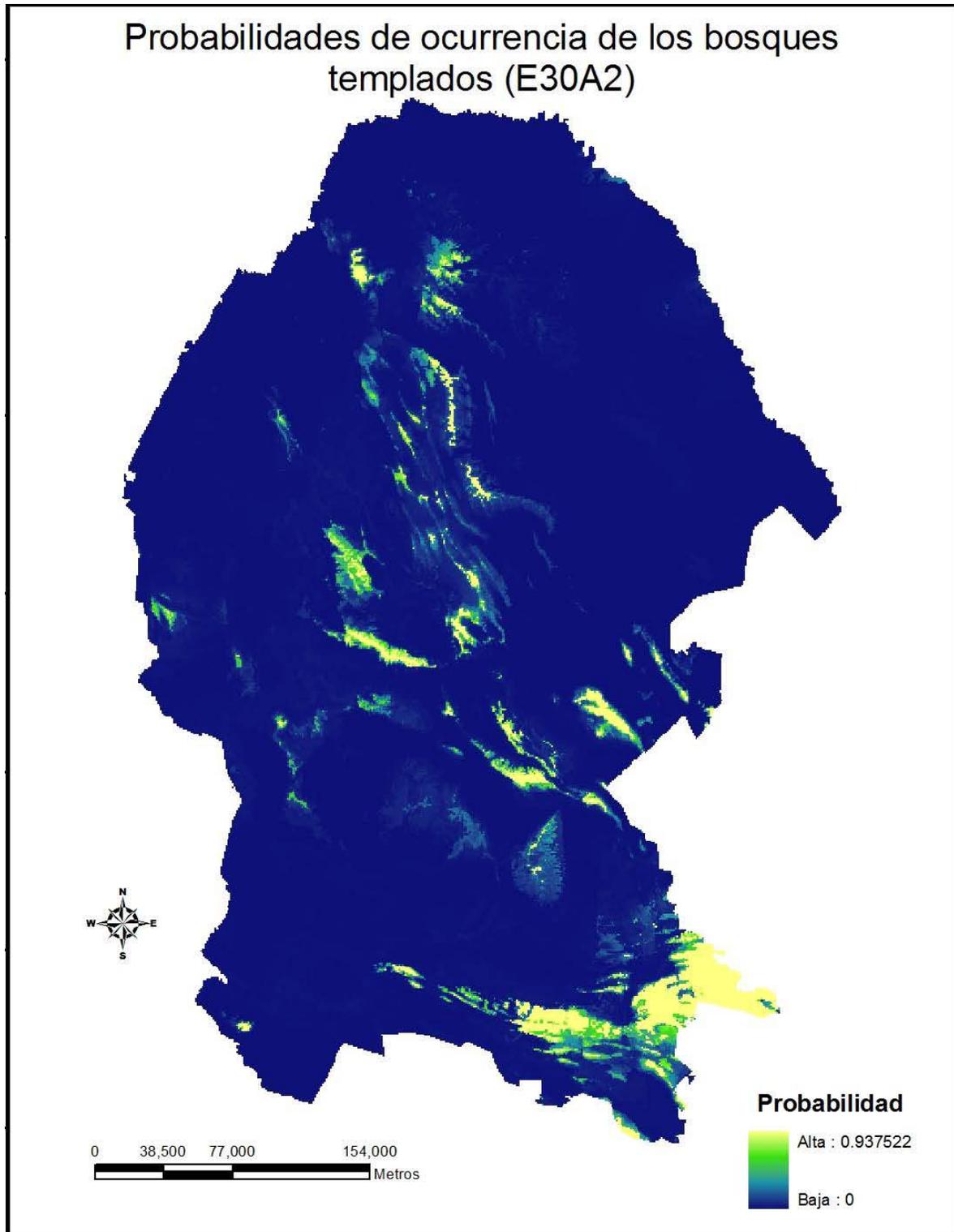


Figura 8. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados en los diferentes pixeles que conforman el mapa para el escenario E30A2.

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (E30B2)

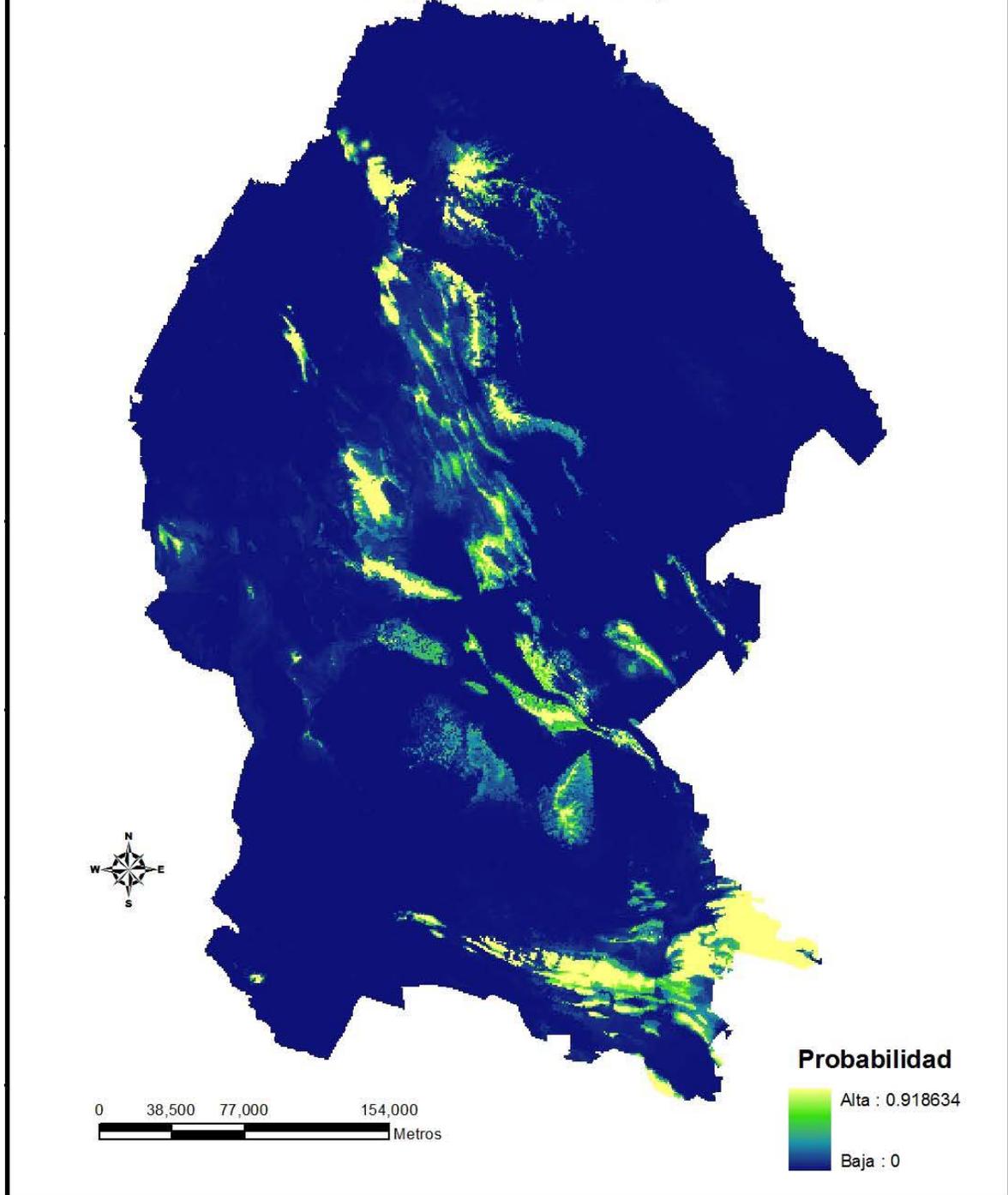


Figura 9. Mapa donde se muestran los valores de las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados de Coahuila, para el escenario B2 modelado con ECHAM5.

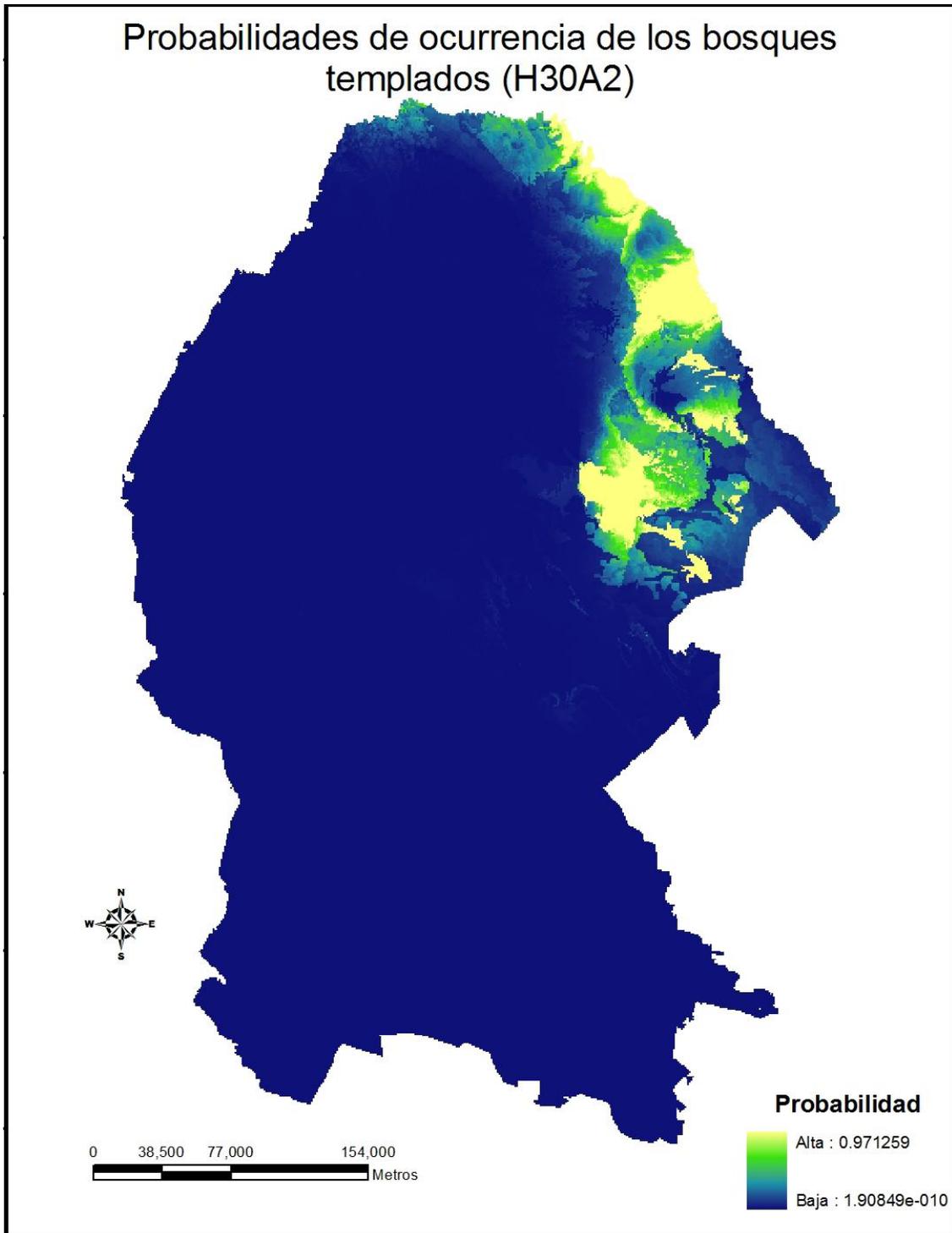


Figura 10. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, donde las probabilidades altas se presentan en una proporción más grande que las observadas en los mapas anteriores. Escenario H30A2.

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (H30B2)

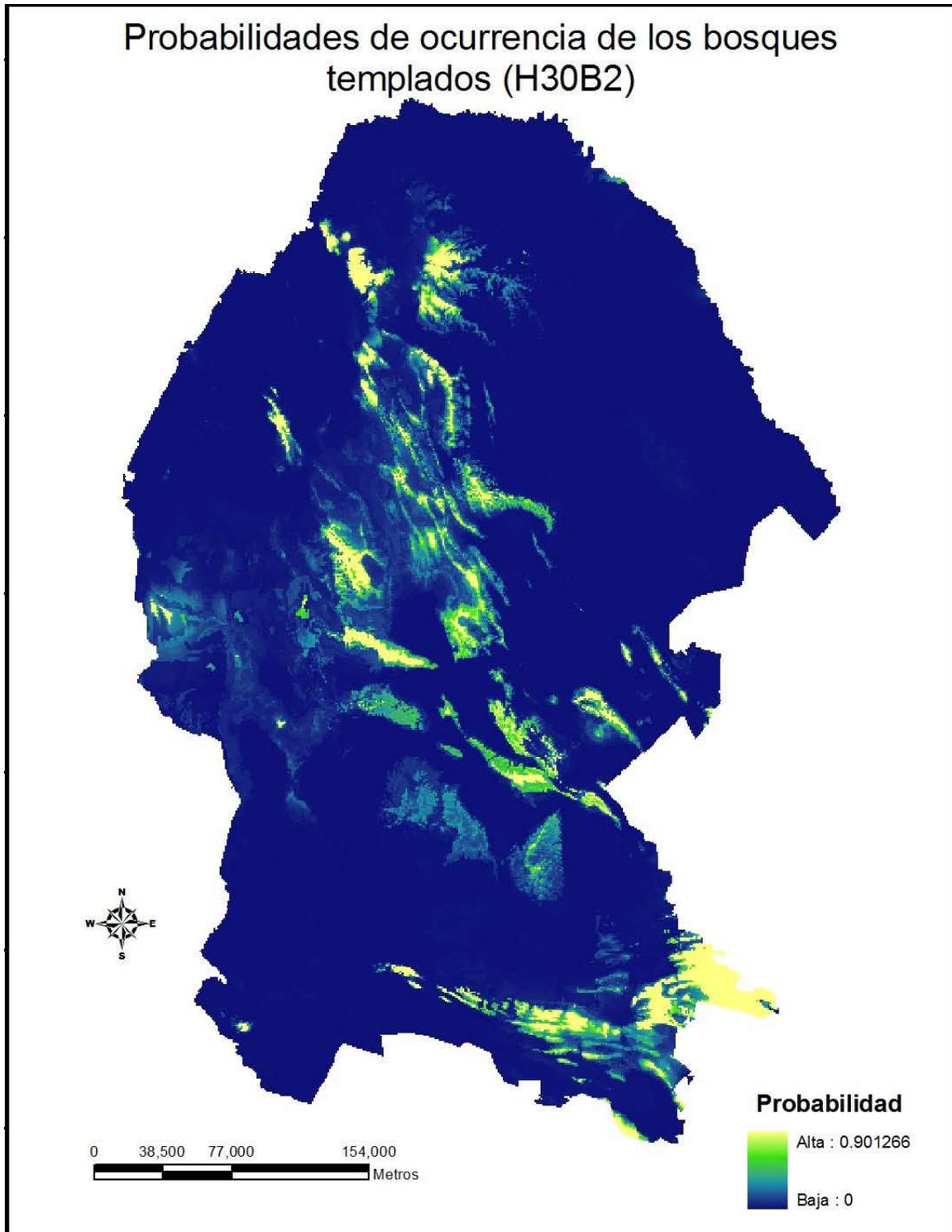


Figura 11. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, empleando las salidas del modelo HadGEM1 para el escenario B2.

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (E50A2)

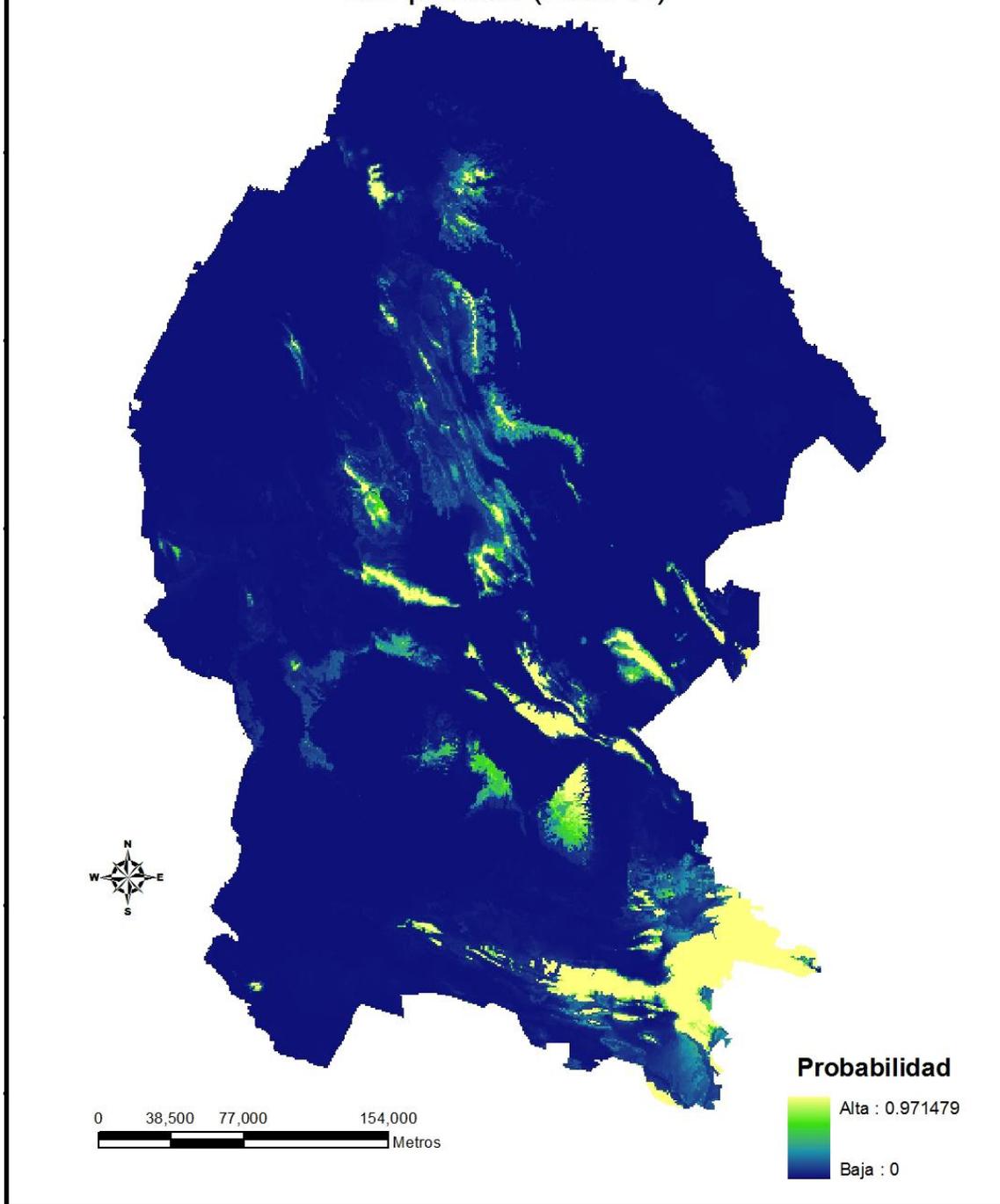


Figura 12. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados bajo el escenario A2, donde los valores más altos se presentan en los colores claros y en oscuro los más bajos. Escenario E50A2.

Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados (E50B2)

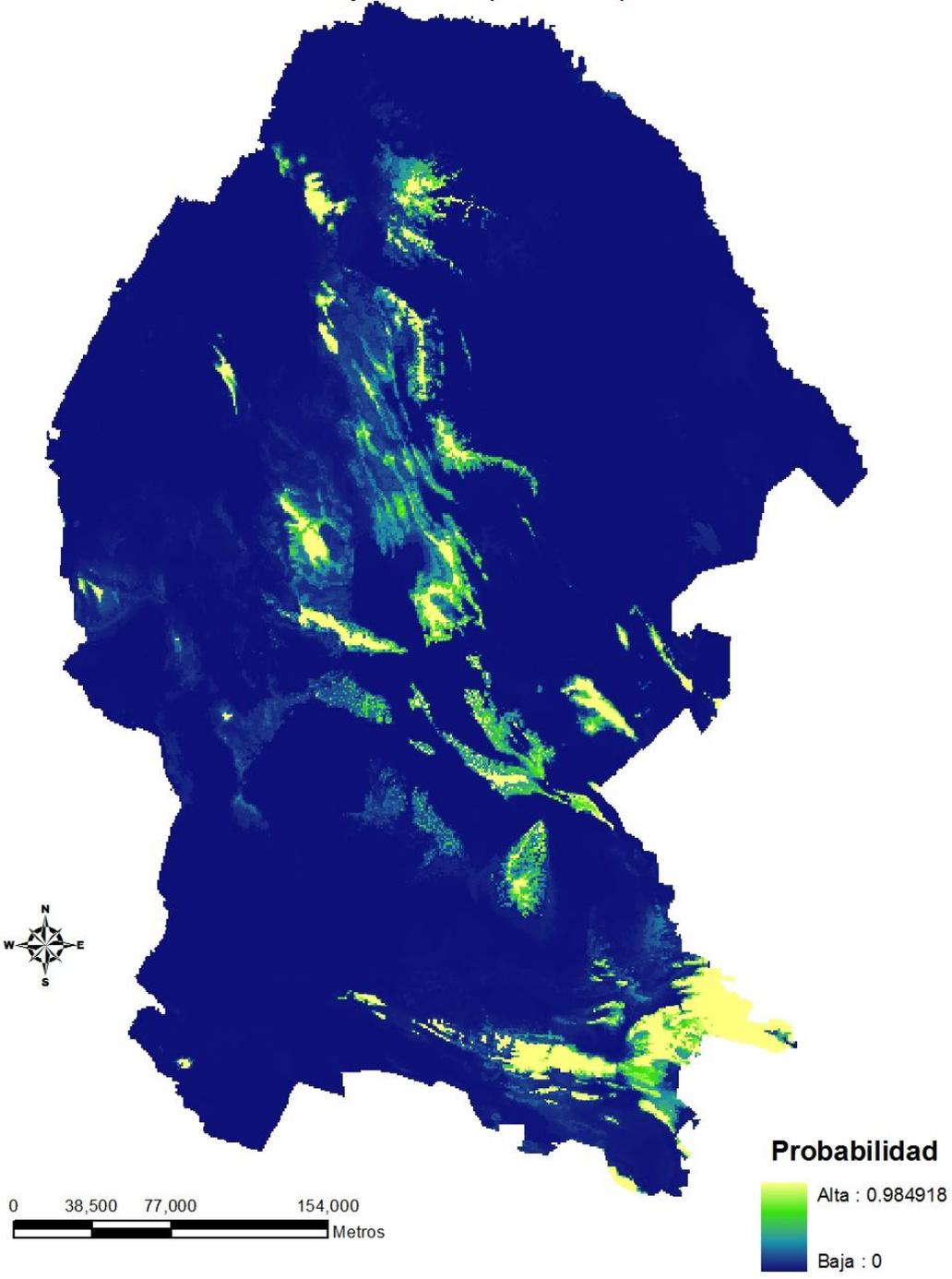


Figura 13. Probabilidades de ocurrencia de los bosques templados para el escenario E50B2.

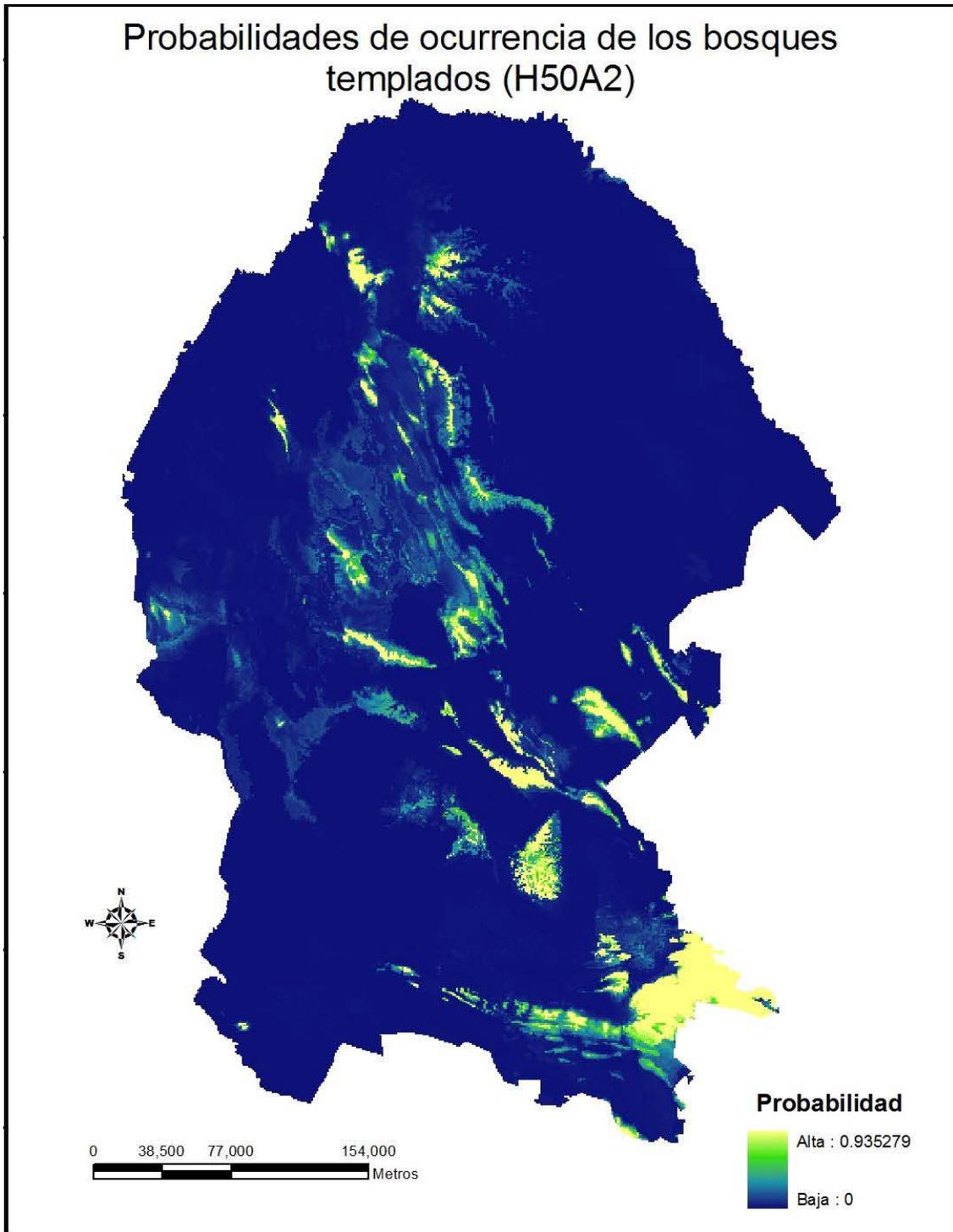


Figura 14. Las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, para cada una de las combinaciones climáticas registradas en cada uno de los pixeles del mapa, cuyas variaciones climáticas provienen del escenario A2 modelado con HadGEM1.

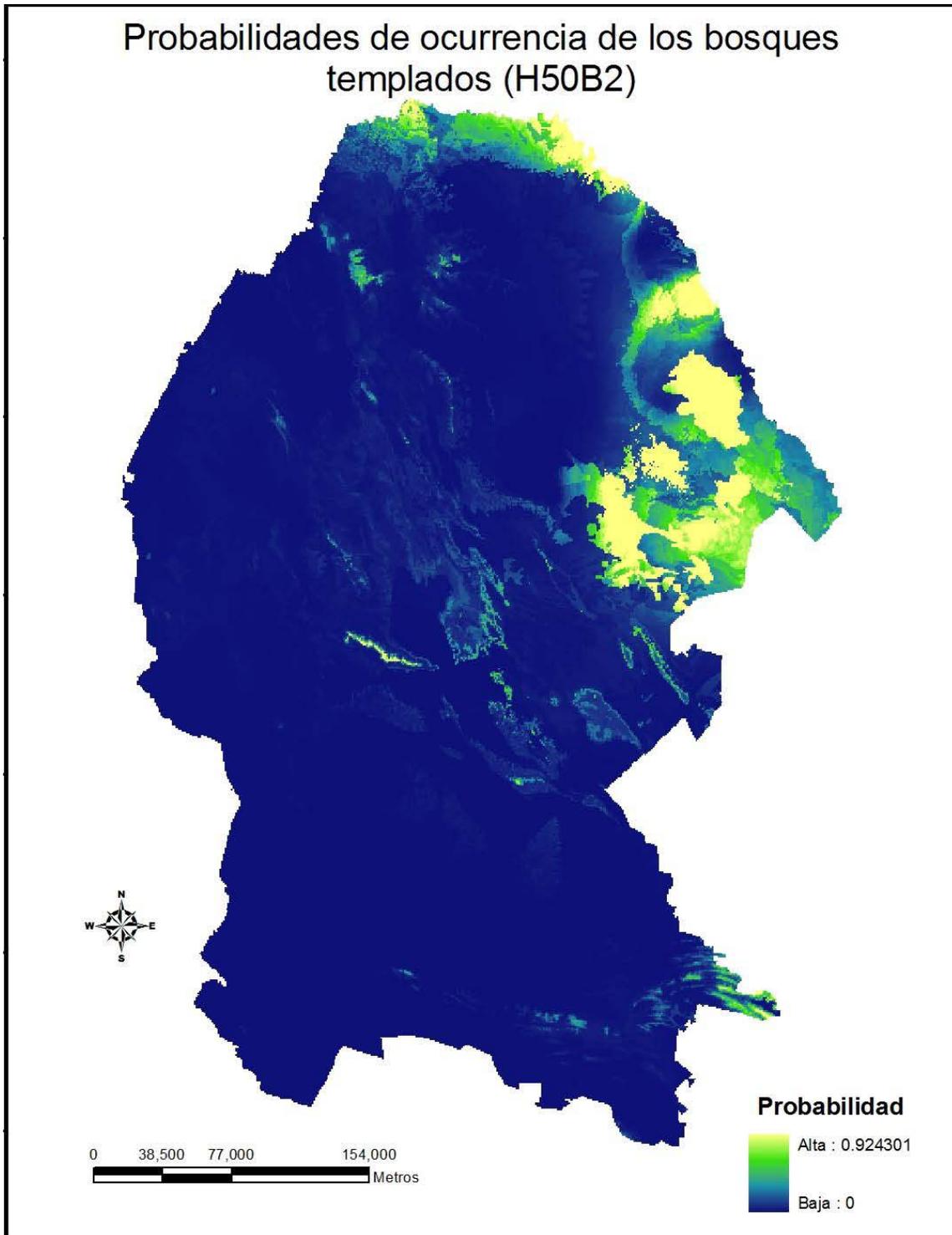


Figura 15. Mapa donde se expresan las probabilidades de ocurrencia de los bosques templados, donde los pixeles con los colores más claros tienen los valores más altos de probabilidad. Escenario H50B2.

En base al umbral aplicado sobre las probabilidades obtenidas en el modelo de máxima entropía para los bosques templados, se tiene que éstos se distribuyen en donde las condiciones son las siguientes: el trimestre más seco del año presenta temperaturas entre 12 y 17 grados; la temperatura del cuartil más frío oscila entre 4 y 13 grados Celsius; la precipitación del trimestre más caluroso es entre 83 y 322 mm; la precipitación anual fluctúa entre 223 y 813 mm; la estacionalidad de la precipitación es del 44% al 88%; la temperatura tiene una variabilidad entre 4 y 7 grados Celsius; la temperatura media anual oscila entre 7 y 22 grados Celsius. Las distribuciones obtenidas para cada uno de los escenarios se pueden observar en las siguientes imágenes, en donde se pueden apreciar los cambios que los bosques tendrían en su distribución espacial. También se presentan los resultados del *clamping* de cada uno de los escenarios.

7.2. Escenarios A2

La distribución potencial de los bosques templados para el año 2030 bajo el escenario A2 modelado por ECHAM5, presentaría una reducción del 87.44% del área de cobertura, respecto con el área obtenida en la distribución potencial actual (1, 626, 086 ha), (Figura 16). Aunque la reducción podría ser menor debido a los resultados del *clamping*, en donde se puede observar que existen áreas altamente afectadas por el *clamping* (Figura 17). Mientras que la distribución de los bosques templados para el escenario A2 modelado con ECHAM5 para el año 2050, estima una reducción en el área del 72.1%, cubriendo sólo 453,011.35 ha, lo que representaría el 27.8% de la distribución potencial actual. Las diferencias con el *clamping* son casi nulas (Figura 17).

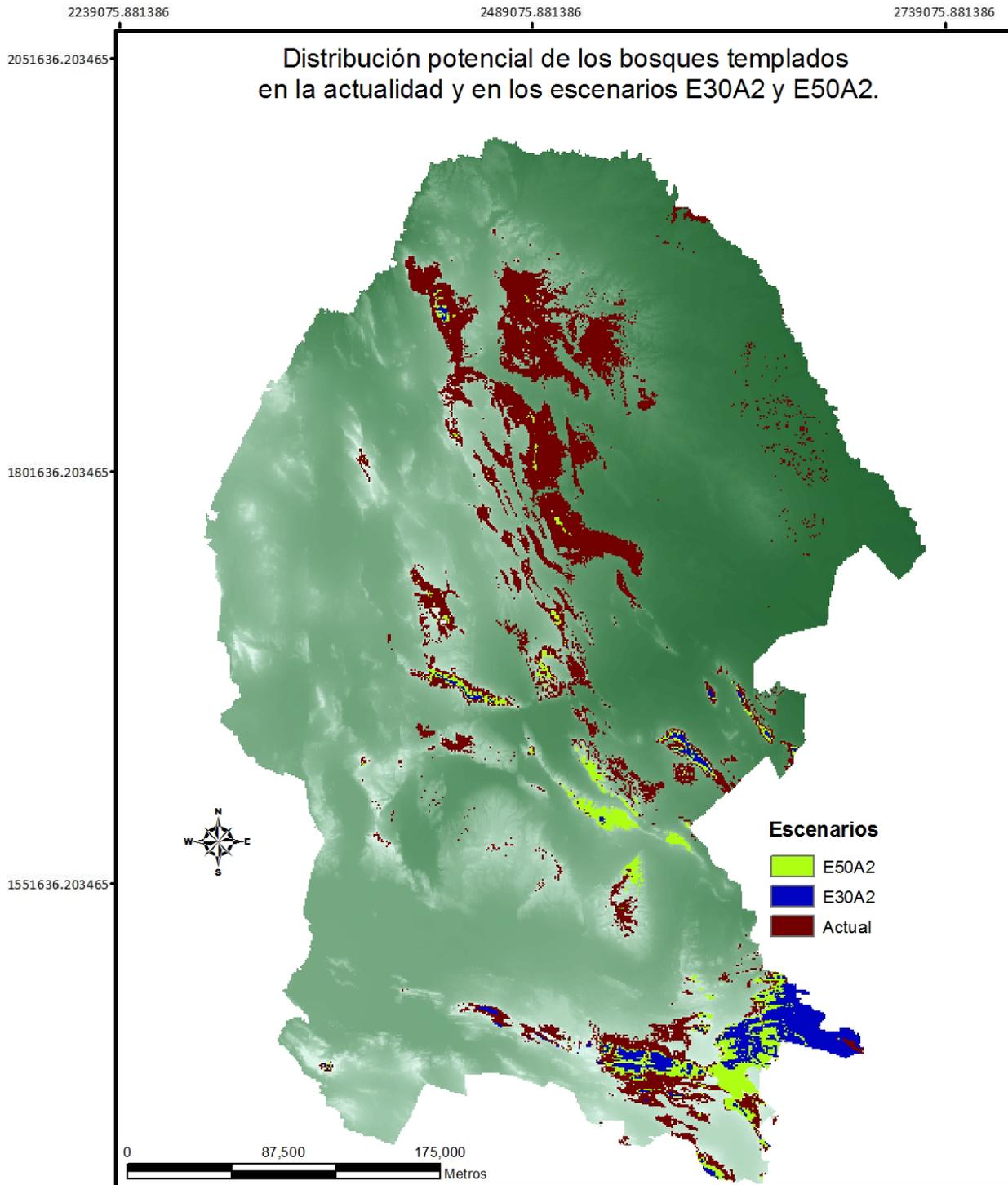


Figura 16. Distribución potencial de los bosques templados bajo los escenarios A2 modelados con ECHAM5 para los años 30 y 50. Las distribuciones se encuentran superpuestas sobre la capa del escenario actual.

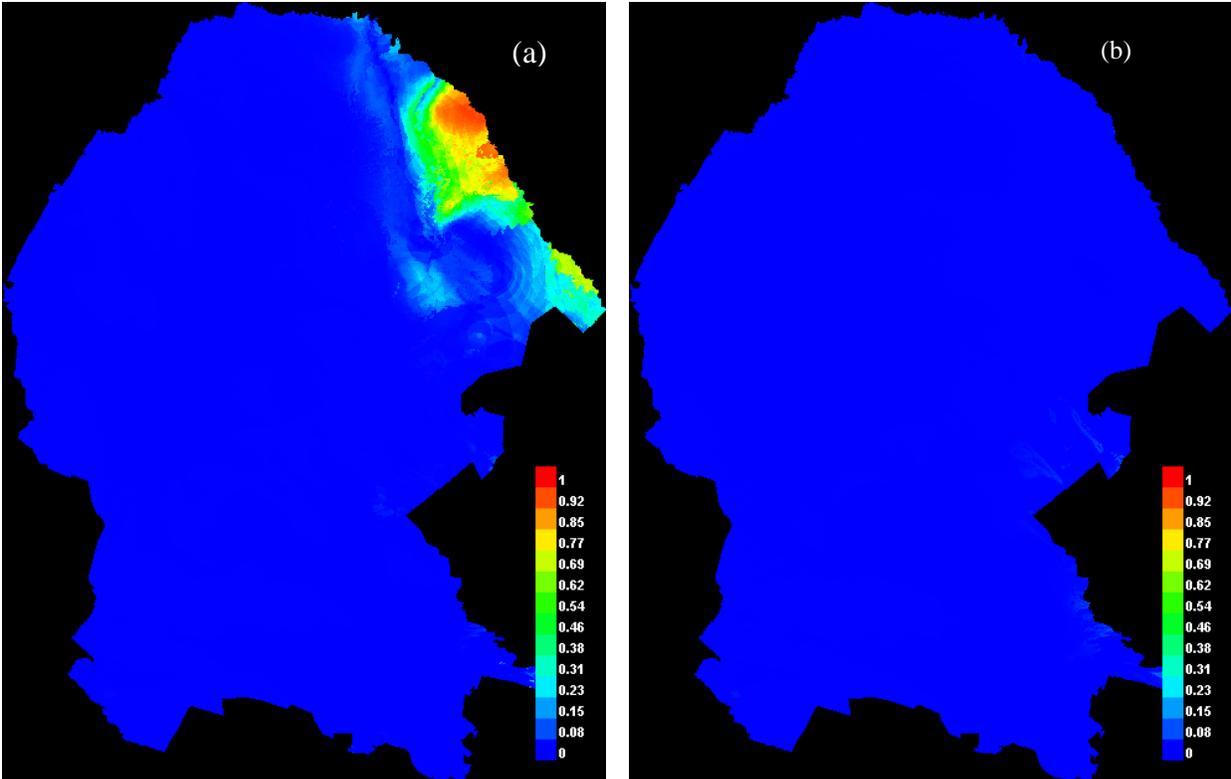


Figura 17. Mapas del *clamping*. (a) Los resultados para el escenario E30A2, mientras que (b) para el escenario E50A2. La gama de rojos representan las probabilidades más altas, mientras que los azules las más bajas.

Por otra parte, las distribuciones potenciales obtenidas bajo los escenarios A2 bajo el modelo HadGEM1, muestran una reducción del 92.27% para el año 2030, mientras que para el año 2050 la reducción estimada fue del 82.99% (Figura 18), aunque como en el caso anterior, los resultados del *clamping* presentan mayores diferencias en el escenario del 2030 que en el 2050 (Figura 19).

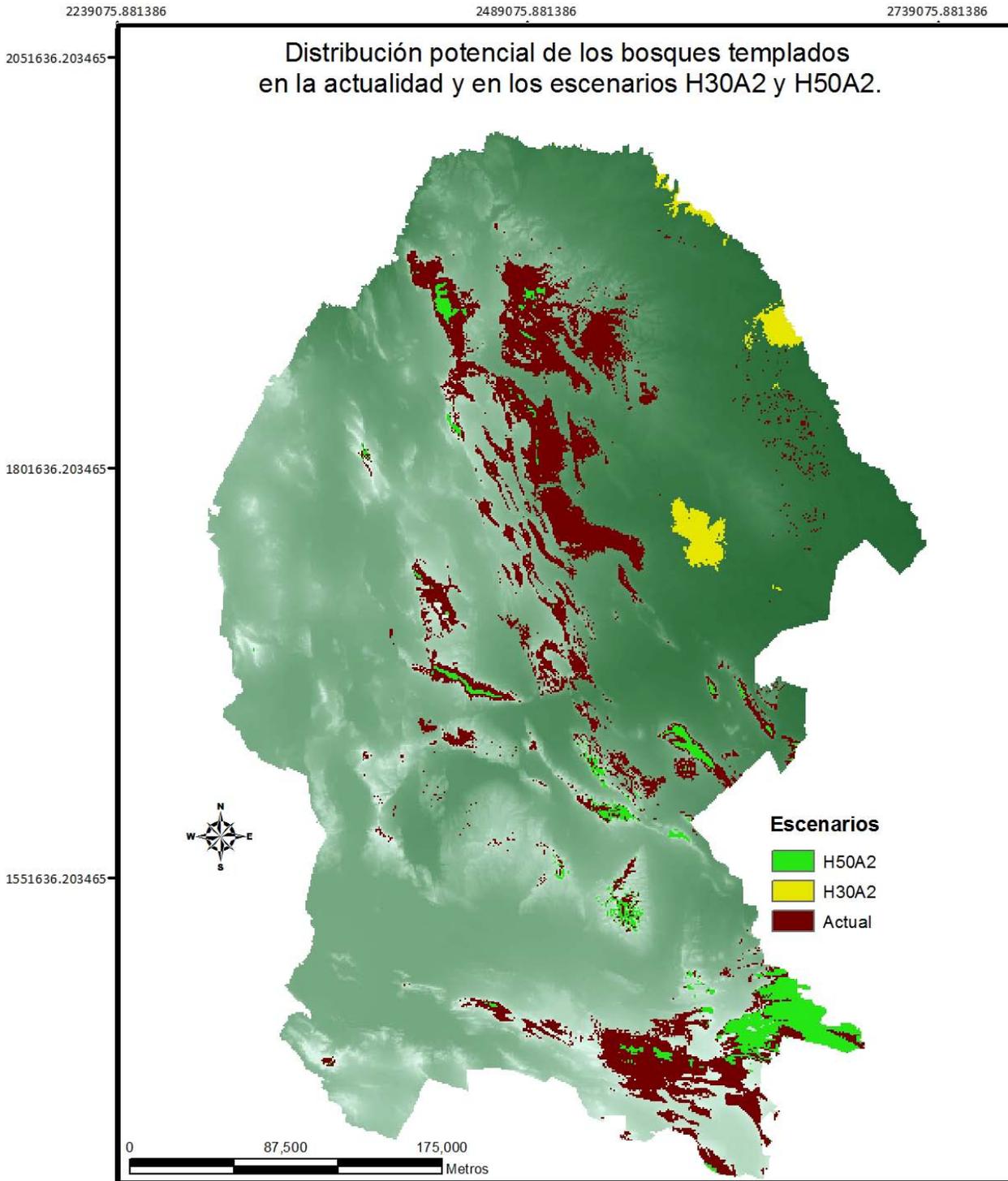


Figura 18. Distribución potencial de los bosques templados bajo los escenarios H30A2 y H50A2. Las distribuciones se encuentran superpuestas sobre la distribución actual potencial. En el caso del escenario H30A2 el área que cubre en el mapa tiene una distribución espacial totalmente diferente a la actual y la del escenario H50A2.

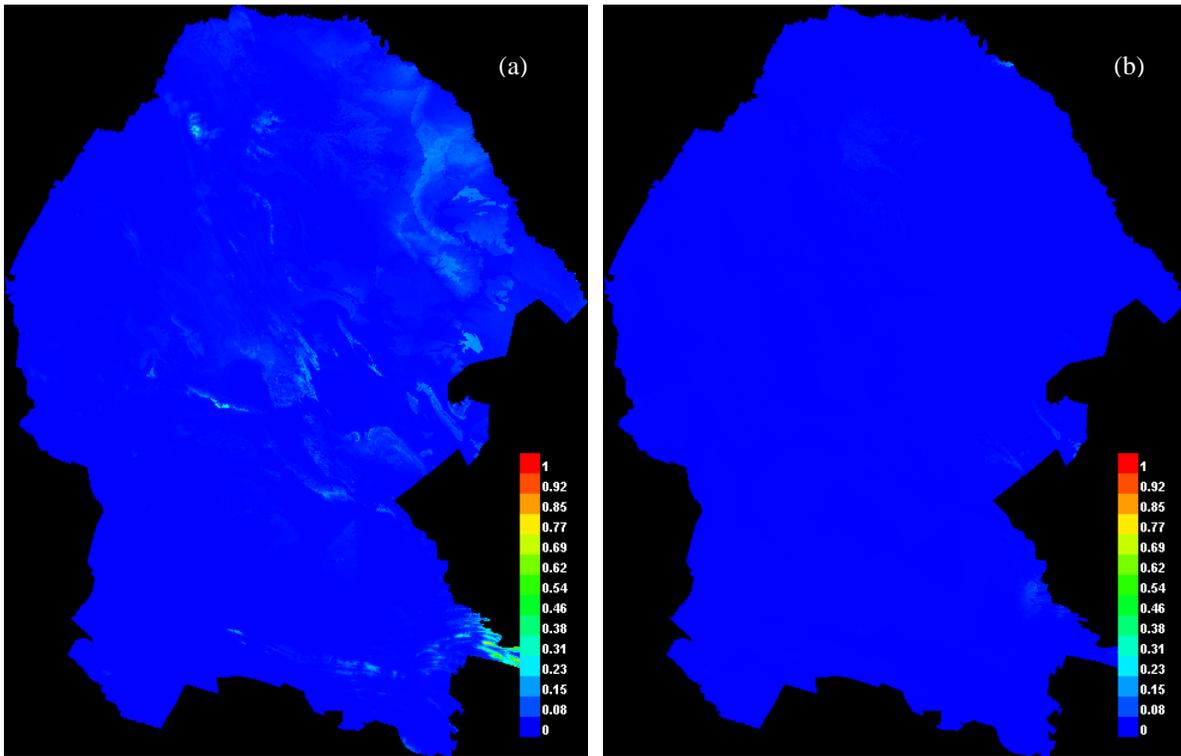


Figura 19. Resultados del *clamping* para los escenarios (a) H30A2 y (b) H50A2, donde se puede apreciar que existe un efecto mayor cuando se realiza el *clamping* en el escenario H30A2 que en el H50A2.

7.3. Escenarios B2

Las distribuciones potenciales para los escenarios B2 muestran una menor reducción de los bosques templados para el año 2030, pero todo lo contrario para el 2050. En el caso de los escenarios E30B2 y E50B2, las áreas de cobertura son de 387,102.87 ha y de 303,465.11 ha, lo que representa una reducción del 76% y 81% respectivamente (Figura 20). Así como los resultados del *clamping* no muestran muchas posibles áreas afectadas por esto (Figura 21).

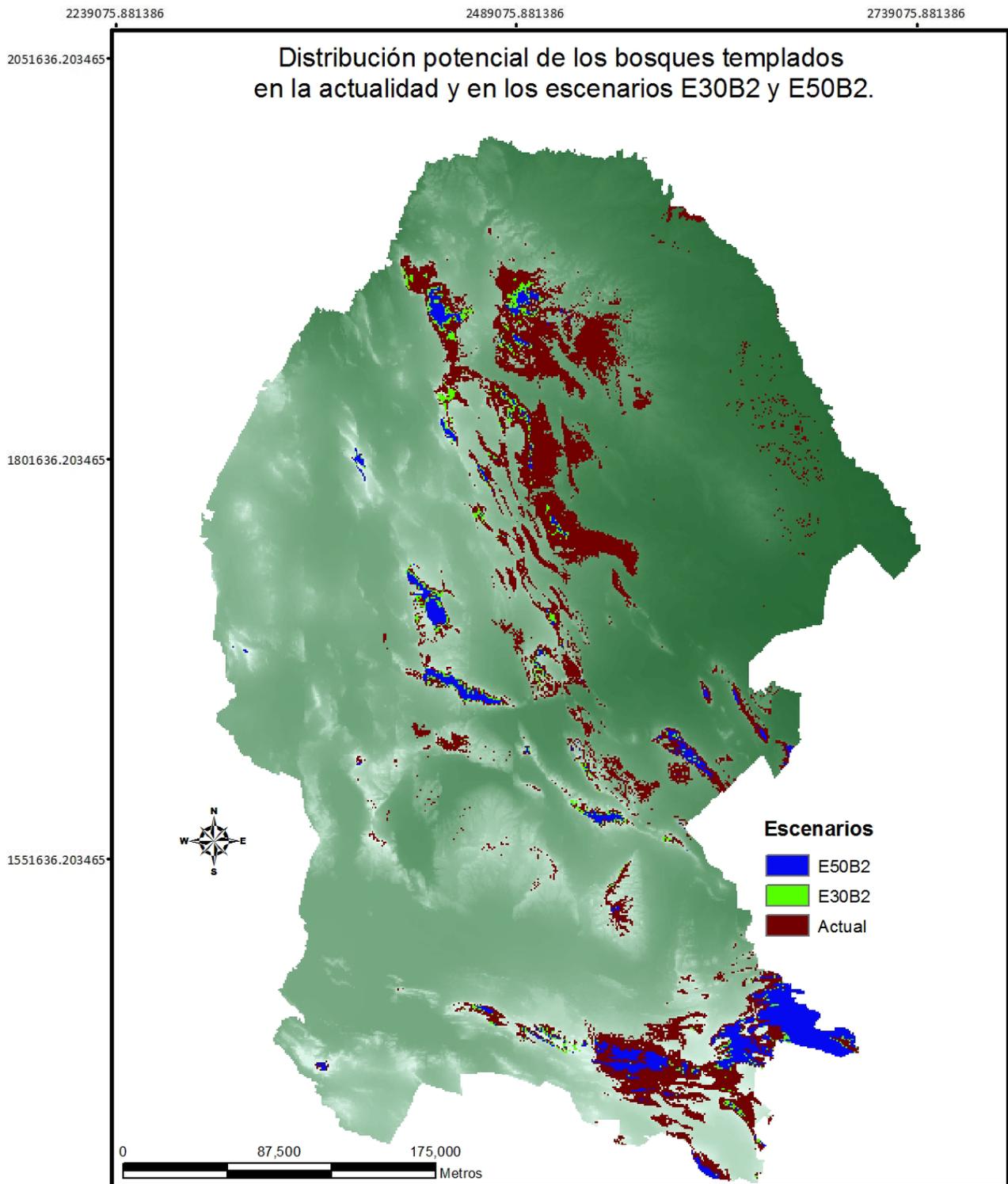


Figura 20. Distribuciones potenciales para los escenarios E30B2 y E50B2. Las distribuciones se encuentran superpuestas en la actual. La distribución con menor cobertura es la del escenario E50B2, la cual está superpuesta en gran parte sobre la cobertura del escenario E30B2.

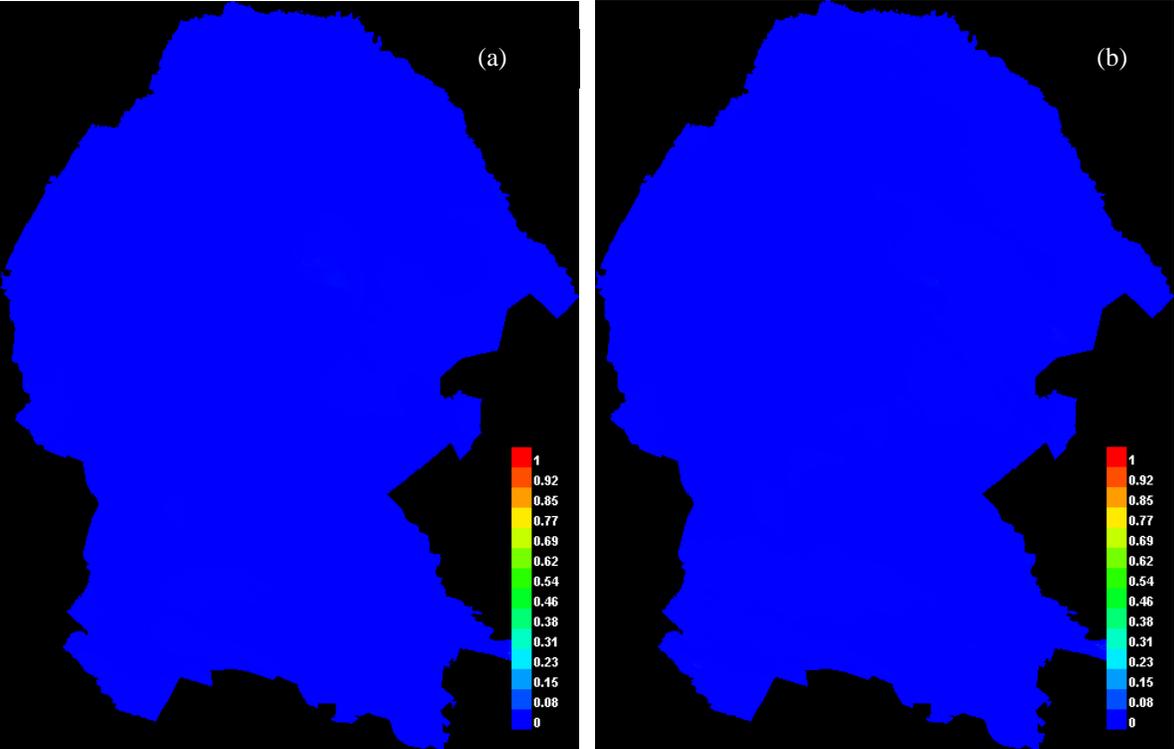


Figura 21. Resultados del *clamping* donde las posibilidades de que existan áreas afectadas por esto son casi nulas. (a) E30B2 y (b) E50B2.

Mientras que para los escenarios H30B2 y H50B2 las distribuciones potenciales de los bosques templados tiene un área de 247,892.12 y 149,387.20 hectáreas, respectivamente. Lo anterior representa una reducción de los bosques templados en un 84.7% y 90% (Figura 22). Sin embargo a diferencia de los escenarios E30B2 y E50B2, los resultados del *clamping* si presentan muchas posibles áreas afectadas por esto (Figura 23).

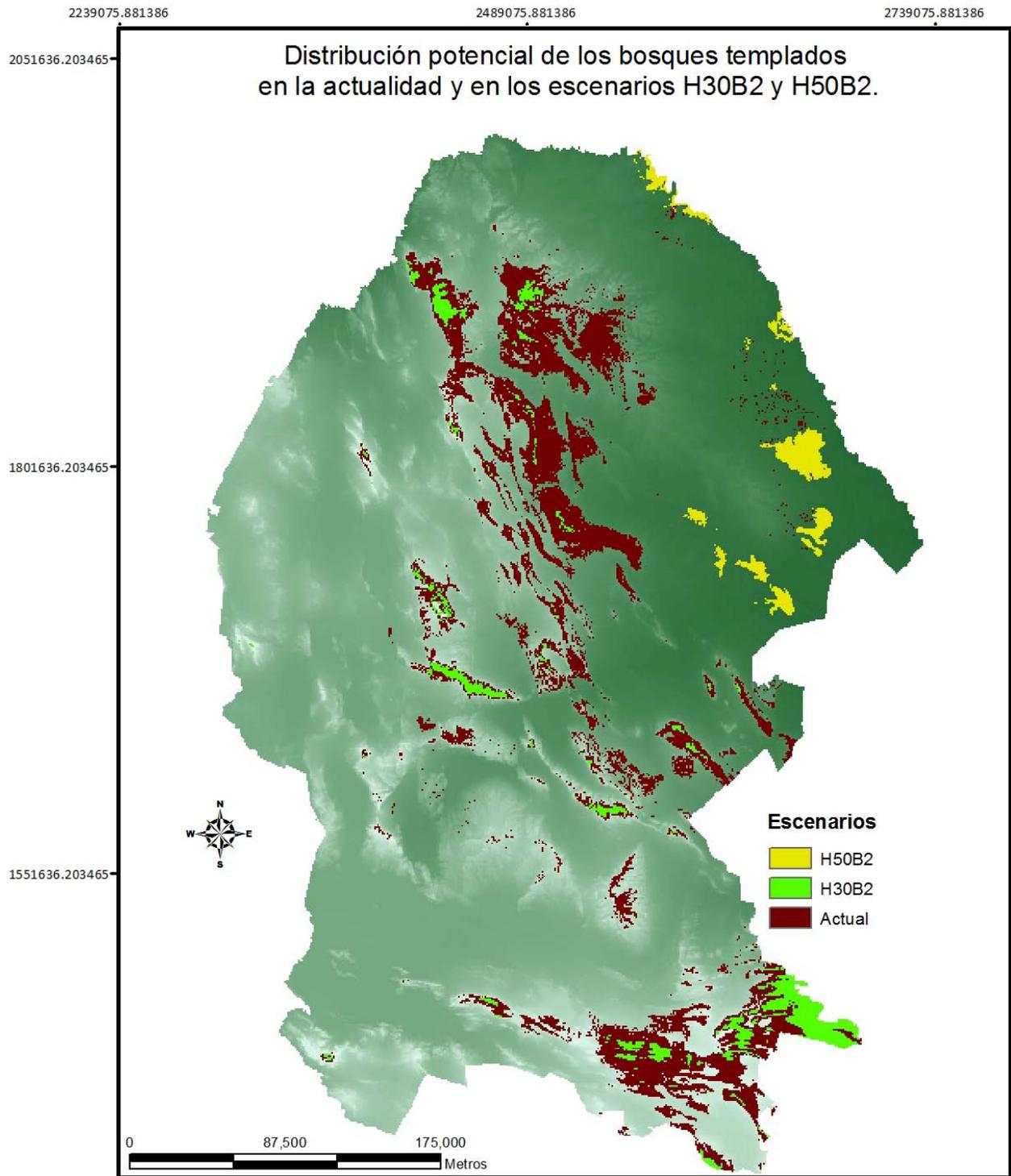


Figura 22. Distribución potencial de los bosques templados para los escenarios H30B2 y H50B2. Las distribuciones se encuentran superpuestas. La que tiene menor cobertura y una distribución espacial diferente es la del escenario H50B2.

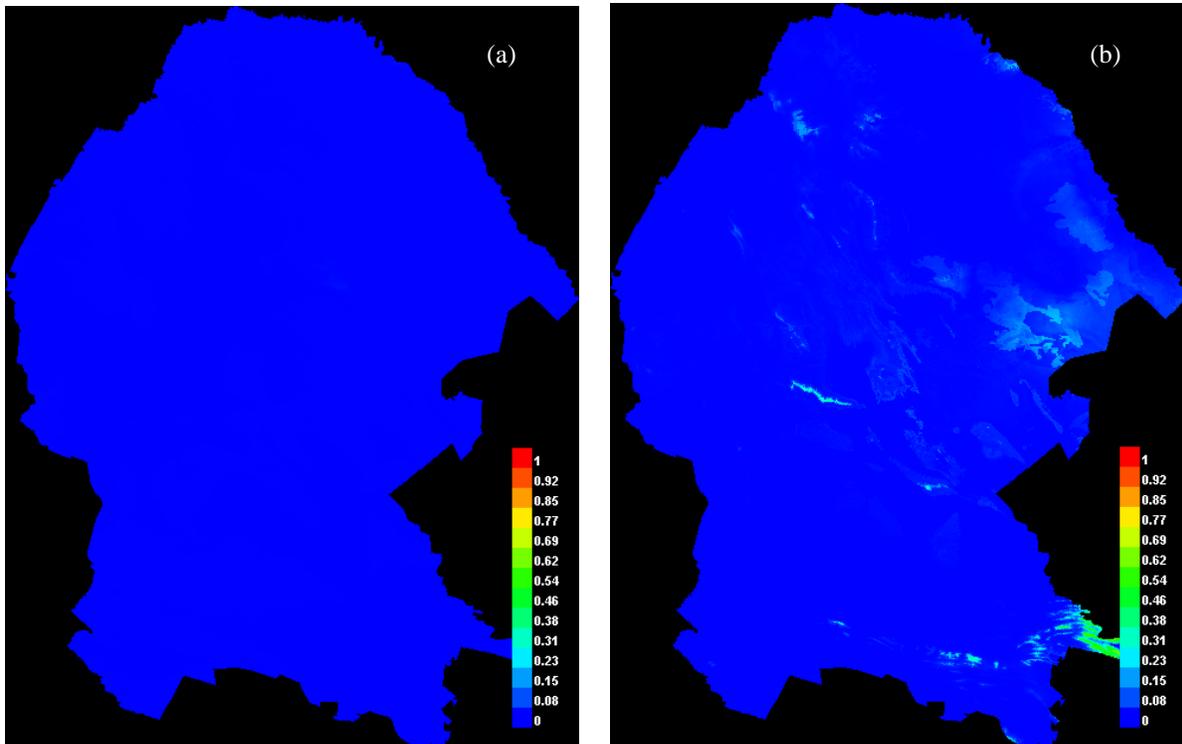


Figura 23. Resultados del *clamping* para los escenarios (a) H30B2 y (b) H50B2. Sólo en el escenario H50B2, se presentan muchas áreas con probabilidades de ser afectadas por el *clamping*.

A continuación se presenta el cuadro de las áreas de cobertura de las distribuciones potenciales, para cada uno de los escenarios y el porcentaje de reducción de los bosques templados (Cuadro 6).

Cuadro 6. Porcentajes de cobertura de las distribuciones potenciales de los bosques templados para cada uno de los escenarios.

Escenario	% de Reducción	% de Cobertura respecto a la actual
E30A2	87.4	12.6
E30B2	76.2	23.8
H30A2	92.3	7.7
H30B2	84.8	15.2
E50A2	72.1	27.86
E50B2	81.3	18.7
H50A2	83.0	17.0
H50B2	90.8	9.2

7.4. Validación del modelo y análisis de las variables bioclimáticas (Análisis de los coeficientes de correlación de las variables).

El modelo fue desarrollado con 7 variables climáticas y una edáfica (Figura 24). Las variables climáticas fueron elegidas de entre 19 variables (Cuadro 5), siendo seleccionadas las que presentaron menos del 0.8 de correlación (Cuadro 7). De tal forma, las variables suprimidas fueron las que su coeficiente de correlación superaban el 0.8, ya que no eran explicativas para el modelo, de hecho se hizo una prueba con variables con correlaciones mayores a 0.85, dando resultados muy distintos en las proyecciones, con áreas mayores a la distribución actual (Figura 25). En el caso de las variables Mmtmp, Iso, Tmpmc, Tmpmf y Rtmpa, los coeficientes de correlación fueron menores al 0.8, pero las variables sólo se tenían disponibles para el escenario actual más no para los escenarios futuros, lo cual no permitió hacer una proyección con dichas variables y por eso no fueron empleadas en el modelado.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de las variables climáticas utilizadas en el modelado

Variables	Cuartcp	Cuartct	Cuartfp	Cuartft	Cuartlluvp	Cuartlluvt	Cuartsp	Cuartst	Estprcp	Estt	Mms	Prcp	Mmlluv	Tmp
Cuartcp	1.00													
Cuartct	-0.40	1.00												
Cuartfp	0.53	0.09	1.00											
Cuartft	-0.28	0.56	-0.14	1.00										
Cuartlluvp	0.91	-0.24	0.66	-0.28	1.00									
Cuartlluvt	-0.42	0.92	-0.13	0.63	-0.37	1.00								
Cuartsp	0.47	0.20	0.94	-0.15	0.63	-0.02	1.00							
Cuartst	-0.26	0.17	-0.35	0.65	-0.33	0.28	-0.51	1.00						
Estprcp	0.28	-0.36	-0.43	0.02	0.26	-0.27	-0.49	0.38	1.00					
Estt	-0.32	0.88	0.17	0.10	-0.14	0.74	0.31	-0.17	-0.44	1.00				
Mms	0.42	0.25	0.85	-0.10	0.61	0.03	0.94	-0.49	-0.42	0.35	1.00			
Prcp	0.75	0.07	0.85	-0.19	0.89	-0.12	0.87	-0.45	-0.13	0.17	0.86	1.00		
Mmlluv	0.71	0.11	0.67	-0.11	0.90	-0.05	0.71	-0.34	0.13	0.18	0.73	0.93	1.00	
Tmp	-0.41	0.94	0.00	0.77	-0.29	0.91	0.07	0.37	-0.24	0.69	0.13	-0.04	0.03	1.00

Los valores en amarillo son los más altos. Los valores con signo negativo son debidos a que una de las variables disminuye mientras la otra aumenta.

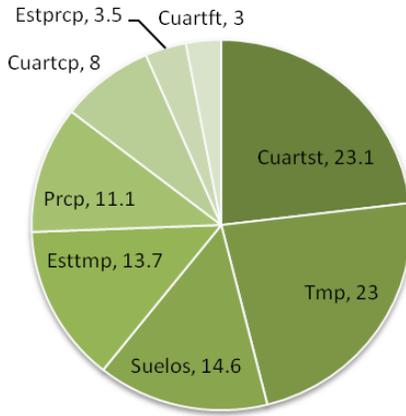


Figura 24. Porcentajes de contribución de cada variable al modelo de máxima entropía.

La importancia de cada una de las variables utilizadas se muestra en la siguiente figura. En ella se puede ver que la variable con más peso es la temperatura del cuartil más seco (Cuartst) y la de menor contribución es la temperatura del cuartil más frío.

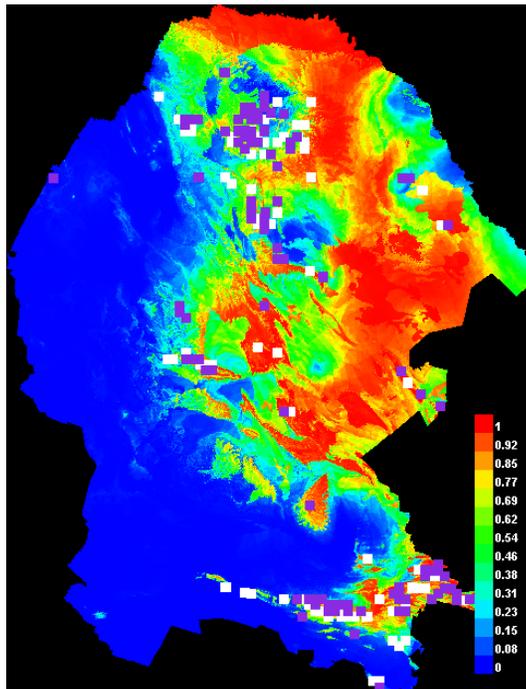


Figura 25. Mapa de las probabilidades de ocurrencia de la proyección H50B2 con las variables con coeficientes de correlación mayores a 0.85.

El área bajo la curva fue de 0.94 para los datos de entrenamiento y 0.954 para los de prueba, estando muy por arriba de lo previsto para las predicciones al azar (0.5), lo cual indica que el modelo describe bastante bien la distribución de los bosques templados en función de las variables climáticas y edáfica. La desviación estándar calculada para el área bajo la curva fue de 0.004. En la siguiente curva del receptor de características operativas (ROC) se pueden observar los valores del área bajo la curva (Figura 26).

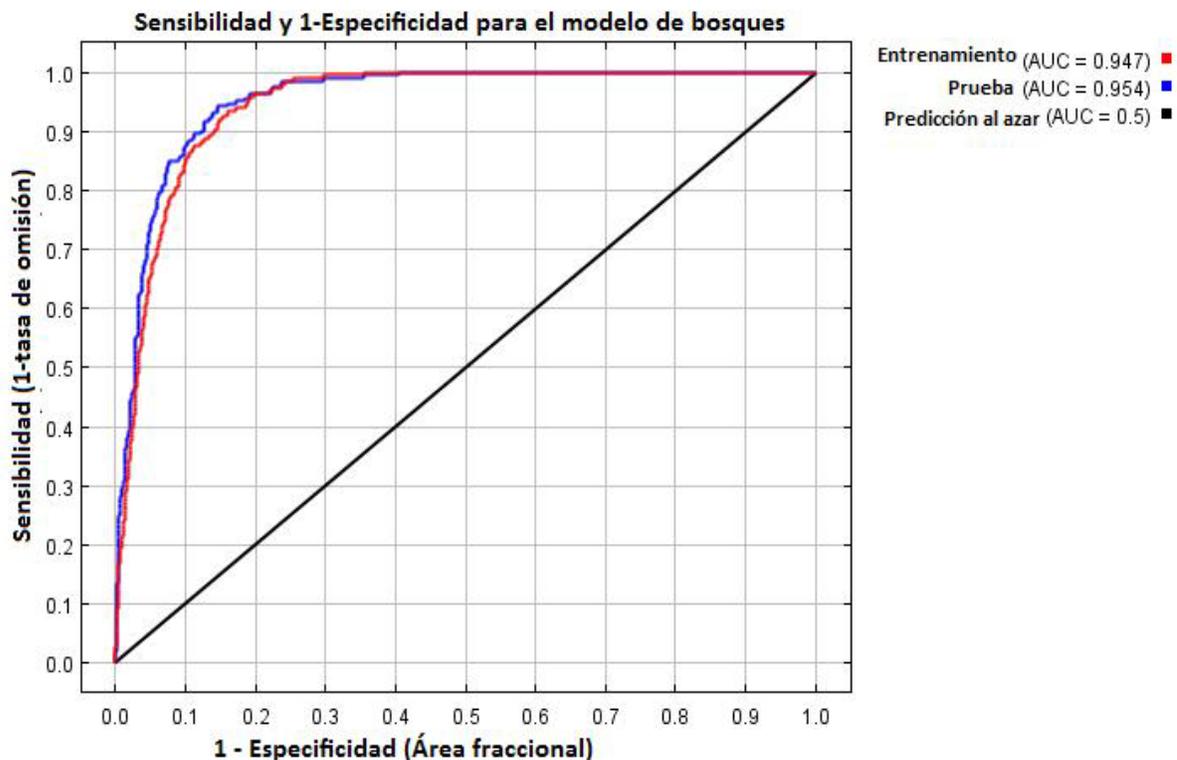


Figura 26. Curva ROC para el modelo de máxima entropía donde los valores del área bajo la curva son mayores que las distribuciones al azar. La sensibilidad representa las presencias acertadamente predichas, mientras que la especificidad las ausencias predichas.

8. Discusión

Aunque los resultados obtenidos sobre las distribuciones potenciales presentan una tendencia no esperada, ya que en el horizonte 2030 la mayoría de las proyecciones presentan más cambios respecto a la distribución actual que lo visto en las proyecciones del 2050, existen diferentes factores que pueden explicar esta situación. Uno de estos factores es el efecto del *clamping* en los resultados del modelado, como consecuencia las probabilidades de ocurrencia podrían variar mucho si los valores de las variables ambientales son sometidos o no al *clamping*.

También es posible que la distribución potencial aquí presentada podría ser modelada mejor, si se utilizaran más variables que no provoquen tanta colinealidad en el modelo como son Mmtmp, Iso, Tmpmc, Tmpmf y Rtmpa, que no fueron empleadas porque no se tenían los datos para los escenarios futuros, pero que son ampliamente recomendadas por el WorldClim (2010) como parámetros bioclimáticos. Autores como Benito (2009), han demostrado que el usar variables de más sólo podría quitar tiempo al investigador sin que la modelación sea mejor, así como Guisan y colaboradores (2006), hacen referencia al cuidado que se debe tener con las variables dependiendo si se quiere generar una proyección futura u otro tipo de estudio. Para esto existen diferentes técnicas para reducir la correlación entre variables en un modelo, como el coeficiente de correlación del producto-momento de Pearson y el Análisis de Componentes Principales, dependiendo de cual se utilice será el resultado. Las dos técnicas antes mencionadas tienen una misma limitación, asumen linealidad en el modelo lo que podría no ser cierto para todas las variables y en el caso de los Componentes Principales, estos se pueden calcular por medio de las covarianzas o por correlación.

Una ventaja de haber modelado con MaxEnt es que las distribuciones potenciales obtenidas están en función de las combinaciones de las variables climáticas y que por

tanto el algoritmo elegirá como mejor función la que tenga la mayor entropía (Phillips, 2006). Esto quiere decir que MaxEnt no tomará las combinaciones climáticas actuales y hará una extrapolación de las mismas, puesto que sería cometer el error de suponer que las mismas combinaciones actuales se presentarán en el futuro, lo cual no necesariamente es correcto (Fitzpatrick y Hargrove, 2009). En la Figura 27 se muestra lo que sucede cuando se hacen proyecciones futuras sin pasar por alto lo antes mencionado.

Por lo anterior, todas las proyecciones realizadas tienen diferentes combinaciones climáticas, donde cada una de las variables ambientales está de acuerdo a los escenarios climáticos modelados con los MCGAO. Por lo que las proyecciones de H30A2 y H50B2 no deben ser consideradas como imposibles de existir, aún y cuando los resultados del *clamping* fueran mejores de los obtenidos, dado que al tener cambios en las variables, las nuevas combinaciones que surjan pueden ser favorables para que los bosques templados se distribuyan en ese espacio.

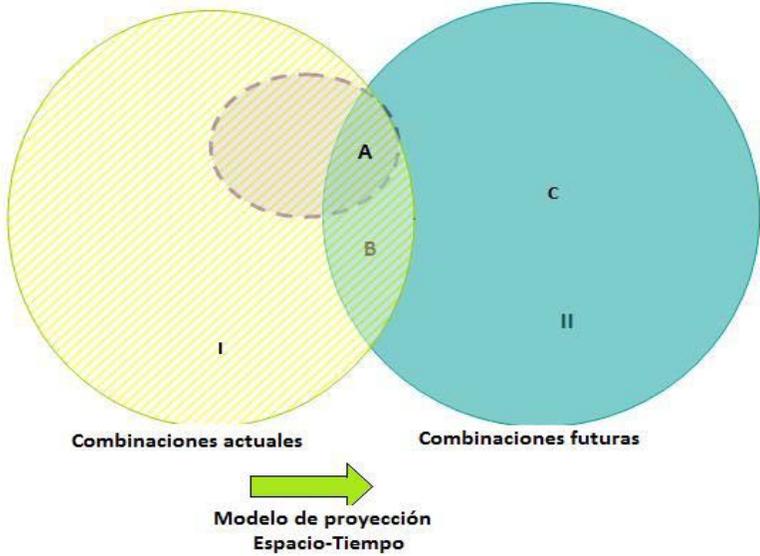


Figura 27. Diagramas de Venn donde se muestra el modelo de proyección en espacio y tiempo. Las combinaciones actuales (I), interceptan las futuras (II) en un momento determinado (B). Cuando se hace una proyección se toman ciertas combinaciones del círculo (I), lo que es representado con la circunferencia punteada. Las combinaciones que en el presente se pueden hacer son las del espacio de A y todas las que no se pueden hacer son las de C. Tomado de Fitzpatrick y Hargrove, 2009.

Los resultados mostraron que con dos de las proyecciones que utilizan escenarios B2 (H30B2 y E50B2) se obtienen distribuciones potenciales más estrechas que con los A2, sin embargo, en los escenarios A2 el calentamiento global es más marcado que en B2 (Carter *et al.*, 2007a; IPCC, 2000). Esto es posible, ya que de los escenarios climáticos se pueden extraer variables bioclimáticas cuyos valores sean benéficos o perjudiciales a ciertas especies y otras no, debido a que el cambio climático afecta diferencialmente a las especies (Villers-Ruiz *et al.*, 2009). También se debe tomar en cuenta que las variables bioclimáticas provienen de las salidas de los modelos globales, los cuales pueden ser muy diferentes a escala local (Pérez, 2001; Harvey *et al.*, 1997) y que en los próximos años pueden ser mejor estimados, conforme los métodos y programas de cómputo sean cada vez mejores.

Por otra parte, las proyecciones obtenidas en éste trabajo informan de los potenciales cambios que sufrirían los bosques templados. Las transformaciones y pérdidas de los bosques irían desde el 72.1% (E50A2), hasta el 92.2% (H30A2), por lo cual las distribuciones actuales de las especies como *Abies durangensis* var. *coahuilensis*, *Quercus carmenensis*, *Q. coahuilensis*, *Q. gravesii*, *Q. hintoniorum*, *Q. invaginata* y *Q. saltillensis*, se verían altamente afectadas hasta el punto de estar en peligro de extinción, debido a que son endémicas de los bosques templados de la región Megacoahuila (Gymnosperm Database, 2009; Nava-Cruz *et al.*, 2006; Villarreal y Encina, 2005; Encina y Villarreal, 2002; Jiménez-Guzmán y Zúñiga-Ramos, 1991).

Los cambios en dicha distribución no nada más se reflejarían en la pérdida de la biodiversidad, sino también en la disminución de la captura de carbono, el aprovechamiento de recursos forestales y los beneficios que el humano obtiene de ellos (Hastie, 2003). Las comunidades que actualmente reciben pago por servicios ambientales (comunidades ubicadas en Sierra de Zapalinamé) también se verían afectadas, puesto que el cambio climático perjudicaría sus esfuerzos por la conservación y gestión de los recursos de manera sostenible (PROFAUNA, 2010; FAO-OAPN, 2009; Villanueva *et al.*, 2009; INE, 2007; Hernández *et al.*, 2000).

Además del cambio climático existen otros factores antropogénicos que pueden alterar la distribución de los bosques templados como: el cambio de uso de suelo; la contaminación por herbicidas e insecticidas; y la cacería de la fauna, lo cual se traduce en pérdida de dispersores de semillas y diversas transformaciones en la dinámica de los ecosistemas. Dichas interacciones entre flora y fauna no son considerados en la distribución potencial presentada, siendo una limitante de la modelación, aunque una de sus ventajas es que puede resolver los problemas entre las proyecciones climáticas futuras y las actuales (Fitzpatrick y Hargrove, 2009). Por lo cual, MaxEnt al igual que la mayoría de los modelos que son utilizados en proyecciones futuras, carece de una explicación de las capacidades evolutivas y la capacidad de dispersión de las especies, las cuales deben ser consideradas si se quiere llegar a estimar mejor la distribución espacial (Benito, 2009; Trotta *et al.*, 2008; Guisan y Zimmermann, 2000; Soberón y Peterson, 2005).

Por otra parte, una ventaja más es que MaxEnt es un modelo basado en la mecánica estadística, el cual explica la respuesta de las especies ante diferentes variables ambientales. Dicho modelo representa la realidad y la generalidad de manera fiable mientras que sacrifica en cierta forma la precisión, aunque esto ha sido muy discutido puesto que no es necesario que la precisión esté peleada con la generalidad (Peters citado por Guisan y Zimmermann, 2000).

9. Conclusión

La distribución potencial obtenida en este estudio presenta un cierto grado de correlación en las variables utilizadas, por ello es necesario tomar en cuenta lo visto en la discusión. Independientemente de lo anterior, es posible observar que los bosques muestran una alta vulnerabilidad al cambio climático y en la medida que se identifiquen las áreas más vulnerables, se podrán desarrollar estrategias para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en las diferentes coberturas vegetales de nuestro país.

10. Recomendaciones

Este estudio también confirma la necesidad de seguir monitoreando permanentemente las variables ambientales, para desarrollar modelos con mayor precisión. Además se pueden generar programas de ordenamiento y conservación de los bosques templados, en donde la sociedad tenga una participación activa, promoviendo una explotación de los recursos forestales de manera sostenible mediante programas de manejo forestal. De ésta forma se disminuirá la presión ecológica sobre los bosques templados y se contribuirá a la mitigación del cambio climático (Canadell y Raupach, 2008).

También MaxEnt combinado con los sistemas de información geográfica pueden ayudar a gestionar los recursos naturales de manera sostenible. Puesto que el potencial que tiene para modelar la distribución de especies, lo convierte en una herramienta para la conservación. De hecho no se limita a las proyecciones con variables climáticas, sino además sirve para saber que ambientes prefieren los organismos, sí cerca de las ciudades o de otras áreas forestales (Longoria, 2008). Asimismo se pueden monitorear las plagas y enfermedades de un cierto tipo de vegetación o fauna, al realizar el

modelado del agente dañino o bien hacer un modelado de una especie, de acuerdo a sus presas o depredadores (González, 2008).

En el caso específico de las plantas se pueden tomar como variables las condiciones edáficas, climáticas y humanas (muchas de ellas tomadas de los inventarios florísticos, el INF o bases de datos como las del USDA Plants Database) para establecer sitios de plantación que garanticen mayor sobrevivencia. Por lo pronto, la presente modelación puede servir como referencia para comparar y desarrollar el modelado de las distribuciones potenciales de cada una de las especies endémicas de la región de Coahuila para el diseño del rescate de las mismas.

11. Referencias

- 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.* C. Gay (Comp.). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp. 129 – 144.
- Ahrens, C. D. 2001. *Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere.* 3 ed. Thomson. 454 p.
- Aldama, A. A., J. Aparicio, C. Gutiérrez, M. Martínez, L. González, G. Herrare, I. Mata, M. A. Mejía, G. Ortiz, P. Gallardo, R. Lobato, J. L. Pérez, G. Reza, P. Fritz, J. Ramírez, A. Cardona. 2007. Comportamiento hidrogeológico de los acuíferos Cuatrociénegas y El Hundido, Coahuila, México. *Ingeniería hidráulica en México* 22 (3): 37 – 59.
- Álvarez-Borrego, S. 2007. Principios generales del ciclo del carbono en el océano. *En: Carbono en ecosistemas marinos acuáticos de México.* B. Hernández y G. Gaxiola (Eds.). INE. México. pp 11-28.
- Arellano, J. B. y J. De Las Rivas. 2006. Plantas y cambio climático. *Investigación y Ciencia.* Marzo 2006. pp. 42- 50.
- ATMET. 2009. <http://atmet.com/>. (16 diciembre de 2009).
- Austin, M. P. 1980. Searching for a model for use in vegetation analysis. *Vegetatio* 42: 11 – 21.
- Austin, M. P., R. B. Cunningham y P. M. Fleming. 1984. New approaches to direct gradient analysis using environmental scalars and statistical curve-fitting procedures. *Plant Ecology* 55 (1): 11 – 27.
- Berling, D. J., F. I. Woodward, M. R. Lomas, M. A. Wills, W. P. Quick y P. J. Valdes. 1998. The influence of Carboniferous palaeoatmospheres on plant function: an experimental and modeling assessment. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* (1998) 353: 131-140.

- Benito, B. 2009. Ecoinformática aplicada a la conservación: simulación de efectos del cambio global en la distribución de la flora de Andalucía. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, España. 288 p.
- Benito, B. y J. Peñas. 2007. Aplicación de los modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus* 7: 100 – 119.
- Busby, J. R. 1991. BIOCLIM – A bioclimate analysis and prediction systems.
- Canadell, J. G., y M. R. Raupach. 2008. Managing forestes for climate change mitigation. *Science*. June 2008. 320: 1456-1457.
- Carpenter, G., A. N. Gillison y J. Winter. 1993. DOMAIN: a flexible modeling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* 2: 667 – 680.
- Carter, T. R., K. Alfsen, E. Barrow, B. Bass, X. Dai, P. Desanker, S. R. Gaffin, F. Giorgi, M. Hulme, M. Lal, L. J. Mata, L. O. Mearns, J. F. B. Mitchell, T. Morita, R. Moss, D. Murdiyarso, J. D. Pabon-Caicedo, J. Palutikof, M. L. Parry, C. Rosenzweig, B. Seguin, R. J. Scholes y P.H. Whetton. 2007a. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. 66 p.
http://www.ipccdata.org/guidelines/TGICA_guidance_sdciaa_v2_final.pdf. (11 de febrero de 2010).
- Carter, T.R., R.N. Jones, X. Lu, S. Bhadwal, C. Conde, L.O. Mearns, B.C. O'Neill, M.D.A. Rounsevell y M.B. Zurek. 2007b. New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions. *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, Inglaterra. pp 133-171.

- Castro, M. 2007. El modelado del clima terrestre. Santander Meteorology Group. http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro_resumen.pdf. (10 diciembre de 2009).
- CCA. 2009. Modelo WRF para la República Mexicana. <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/wrf/Archivos/precipitacion.htm>. (2 de diciembre de 2009).
- CCA. 2010. Instrucciones de uso del servidor de mapas del Atlas Climático Digital de México. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/doc/InstruccionesDeUsoACDMV2.pdf>. (29 de enero de 2010).
- CCCma. 2009. http://www.cccma.ec.gc.ca/eng_index.shtml. (16 diciembre de 2009).
- Comité Intersecretarial de Cambio Climático. 2006. México Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INE. México. 212 p.
- CONABIO. 2008. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (11 de febrero de 2010).
- CONAFOR. 2008. Inventario Nacional Forestal y De Suelos: Base de datos, puntos de muestreo. SEMARNAT.
- Conde, C. 2007. México y el cambio climático global. CCA, UNAM. México. 28 p. http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/mexico_cambio_climatico/Mexico_y_el_cambio_climatico_global.pdf. (6 de marzo de 2010).
- Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala, C. Gay. 2008a. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74. (18 de enero de 2010).
- Conde, C., C. Gay, F. Estrada, A. Fernández, F. López, M. Lozano, V. Magaña, B. Martínez, O. Sánchez, J. Ramírez, J. Zavala y D. Zermeño. 2008b. Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional. CCA-UNAM. México. 105 p.

- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. M. Ferrer, R. Araújo, E. Betancourt, G. Villarreal y C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research* 1997 (9): 17 – 23.
- Darwin, C. R. 1995. *The Origin of Species*. Gramercy. 459 p.
- Del Socorro, B. 2009. Análisis del hábitat óptimo y modelado de nicho ecológico para la conservación del venado cola blanca en el centro de Veracruz. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología. Veracruz, México. 93 p.
- Dismukes, G. C., V. V. Klimov, S. V. Baranov, Y. N. Kozlov, J. DasGupta y A. Tyryshkin. 2001. The origin of atmospheric oxygen on Earth: the innovation of oxygenic photosynthesis. *PNAS* 98 (5): 2170 – 2175.
- Encina, J. A. y J. A. Villarreal. 2002. Distribución y aspectos ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae), en el estado de Coahuila, México. *Polibotánica*. Junio 1: 1 – 23.
- Elton, C.S. 1927. *Animal Ecology*. Sidgwick and Jackson. Londres. 207 p.
- ESRI. 2008. Software ArcGIS 9.3.
- FAO. 2005. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: Hacia la ordenación forestal sostenible. FAO. 320 p.
- FAO-OAPN. 2009. Pago por servicios ambientales en áreas protegidas en América Latina. FAO. España. 132 p.
- Fernández-Eguiarte A., J. Zavala-Hidalgo., R. Romero-Centeno. 2010. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>. (18 de enero de 2010).
- Fitzpatrick, M. C., W. W. Hargrove. 2009. The projection of species distribution models and the problem of non-analog climate. *Biodivers. Conserv.* 18: 2255-2261.
- Flamenco, A. y J. F. Mas. 2009. El desvanecimiento de los bosques en México. Boletín de la UNAM, Campus Morelia 22: 1 -2.
- Flores, B. E. 2004. Una propuesta de uso de tecnología CAS en la enseñanza del tema: Interpolación por splines. *En: Memorias de la XIV Semana Regional de Investigación y Docencia en Matemáticas*. Departamento de Matemáticas, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. pp. 53-59.

- Friedman, J. H. 1991. Multivariate adaptive regression splines. *Annals of Statistics* 19(1): 1 – 67.
- Füssel, H-M. y R. J. T. Klein. 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change* (2006) 75: 301-329.
- Füssel, H-M. y J. G. van Minnen. 2001. Climate impact response functions for terrestrial ecosystems. *Integrated Assessment* 2: 183-197.
- Ganopolski, A., C. Kubatzki, M. Claussen, V. Brovkin y V. Petoukhov. 1998. The influence of vegetation-atmosphere-ocean- interaction on climate during the Mid-Holocene. *Science* Vol. 280: 1916-1919.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, adaptado para las condiciones de la República Mexicana. 3ª ed. Offset., Lario Ed. S.A. 252 p.
- GCCRS. 2009. Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar. CCA-UNAM. <http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/>. (10 de enero de 2010).
- Gómez-Díaz, J. D., A. I. Monterroso-Rivas, J. A. Tinoco-Rueda y J. López-García. 2007. Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Zonas Áridas* 11 (1): 61 -69.
- González, A. 2008. Distribución de la zorra del desierto (*Vulpes macrotis*) en relación a sus presas y a su principal depredador, el coyote (*Canis latrans*). Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 76 p.
- González, F. 1998. La vegetación de México y su historia. *Ciencias*. Octubre – Diciembre 52: 58 – 65.
- González, F. 2004. Las comunidades vegetales de México. INE. México. 82 p.
- Guisan, A., O. Broennimann, R. Engler, M. Vust, N. G. Yoccoz, A. Lehmann y N. E. Zimmermann. 2006. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology* 20 (2): 501-511.
- Guisan, A. y N. E. Zimmermann. 2000. Predictive hábitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135 (2000): 147 – 186.

- Gutiérrez, J. M. y M. R. Pons. 2006. Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica. *Revis. C & G*. 20(3-4): 15-28.
- Gymnosperm Database. 2009. <http://www.conifers.org/topics/mex/mextrees.htm>. (30 de marzo de 2009).
- Harmon, L. J., J. J. Kolbe, J. M. Cheverud y J. B. Losos. 2005. Convergence and the multidimensional niche. *Evolution* 59(2): 409 – 421.
- Harvey, D., J. Gregory, M. Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley y J. De Wolde. 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Contribución del Grupo de Trabajo 1 del IPCC. J. T. Houghton, L. Gylvan Meira Filho, D. J. Griggs y K. Maskell, Eds. Inglaterra. 60 p.
- Hastie, C. 2003. The benefits of urban trees. Warwik District Council. 139 p. <http://www.naturewithin.info/UF/TreeBenefitsUK.pdf>. (1 de junio de 2010).
- Henderson-Sellers, A. y K. McGuffie. 1990. Introducción a los modelos climáticos. Omega. Barcelona. 231 p.
- Hernández, G. 2001. Problemática y uso potencial de los recursos vegetales de la zona carbonífera, de Coahuila. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras: Colegio de Geografía, UNAM, México. 72 p.
- Hernández, M. E., L. A. Torres y G. Valdez. 2000. Sequía Meteorológica. *En* : Gay, C. (Comp.): *México, una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp 28 -37.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hirzel, A. H., J. Hausser, D. Chessel y N. Perrin 2002. Ecological- niche factor analysis: how to compute habitat – suitability maps without absence data?. *Ecology* 83(7): 2027 – 2036.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 22: 415-427.

- INE. 2007. Zona sujeta a conservación ecológica Sierra de Zapalinamé.
http://www.ine.gob.mx/descargas/dgipea/03_psa_ch_saltillo.pdf. (1 de junio de 2010).
- INEGI. 2005. Carta de uso actual de suelo y vegetación Serie III, escala 1:250000. México.
- INEGI. 2007. Sistema para la Consulta del Anuario Estadístico del Estado de Coahuila de Zaragoza, Edición 2007.
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/coa/>. (24 de noviembre de 2009).
- INEGI. 2009. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente.
<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/estadisticas/2009/ambiente09.asp?s=inegi&c=2726&ep=15>. (20 abril de 2010).
- Illoldi-Rangel, P. y T. Escalante. 2008. De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía* 3. pp. 7 – 12.
- IPCC. 1997. Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas. Eds. J. T. Houghton, L. G. M. Filho, D. J. Griggs y K. Maskell. Inglaterra. 56 p.
- IPCC. 2000. Escenarios de emisiones: resumen para responsables de políticas. IPCC. 20 p.
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers. *In*: 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 and C.E. Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp 7-22.
- Jackson, R. B., J. T. Randerson, J. G. Canadell, R. G. Anderson, R. Avissar, D. D. Baldocchi, G. B. Bonan, K. Caldeira, N. S. Diffenbaugh, C. B. Field, B. A. Hungate, E. G. Jobbágy, L. M. Kueppers, M. D. Noretto y D. E. Pataki. 2008. Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters*. IOP Publishing. Inglaterra. 3 (2008): 1 -5.

- Jiménez-Guzmán, A. y M. A. Zúñiga-Ramos. 1991. *Anales Inst. Biol. Univ. Nac. Autón. México. Ser. Zool.* 62 (2): 373 – 382.
- Johns, T. C., C. F. Durman, H. T. Banks, M. J. Roberts, A. J. McLaren, J. K. Ridley, C. A. Senior, K. D. Williams, A. Jones, G. J. Rickard, S. Cusack, W. J. Ingram, M. Crucifix, D. M. H. Sexton, M. M. Joshi, B.-W. Dong, H. Spencer, R. S. R. Hill, J. M. Gregory, A. B. Keen, A. K. Pardaens, J. A. Lowe, A. Bodas-Salcedo, S. Stark e Y. Searl. 2006. The new Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): evaluation of coupled simulations. *Journal of Climate* 19: 1327-1353.
- JRC-CCU. 2009. http://ccu.jrc.ec.europa.eu/clm_sci.php. (16 diciembre de 2009).
- Kasting, J. F. y J. L. Siefert. 2002. Life and the Evolution of Earth's Atmosphere. *Science* 296: 1066 – 1068.
- Lamb, H.H. 1982. *Climate history and the Modern World*. Methuen & Co. Londres.
- Laurance, W. F. 2007. Forests and floods. *Nature*. Septiembre 2007. 449: 409 – 410.
- Leathwick, J. R., J. Elith y T. Hastie. 2006. Comparative performance of generalized additive models and multivariate adaptive regression splines for statistical modelling of species distributions. *Ecological Modelling* 199 (2006): 188 – 196.
- Liu, C., P. M. Berry, T. P. Dawson y R. G. Pearson. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28: 385-393.
- Lobo, J. M. y J. Hortal. 2003. Modelos predictivos: un atajo para describir la distribución de la diversidad biológica. *Ecosistemas*. Año XII, No. 1. 9 p.
- Longoria, C. A. 2008. Distribución hipotética de especies de aves y de mamíferos con categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2001, registradas en el Estado de Durango. Tesis de Maestría. IPN-CIIDIR, Durango, México. 79 p.
- Maderey, L. E. y A. Jiménez. 2000. Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global. *En: México, una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. C. Gay (Comp.). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp. 39 – 53.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 2000. Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. *En: México, una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. C. Gay (Comp.).

- Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp. 9 -26.
- Martin, G. M., M. A. Ringer, V. D. Pope, A. Jones, C. Dearden y T. J. Hinton. 2006. The physical properties of the atmosphere in the new Hadley Centre Global Environmental Model (HadGEM1). Part I: model description and global climatology. *Journal of Climate* 19: 1274-1301.
- Milesi, F. A. y J. López. 2005. El concepto de nicho en ecología aplicada: del nicho al hecho hay mucho trecho. *Ecología Austral*. 15: 191 – 148.
- Nava-Cruz, Y., F. J. Espinosa-García y G. R. Furnier-Whitelaw. 2006. Niveles y patrones de variación química en resinas de las hojas del género *Abies* del norte de México. *Agrociencia* 40: 229 – 238.
- Nicholls, A. O. 1989. How to make biological surveys go further with generalized linear model. *Biological Conservation* 50 (1989): 51 – 75.
- Ocampo, F. J. y H. García. 2007. La interacción entre el océano y la atmósfera: aspectos relevantes en la transferencia de gases. *En: Carbono en ecosistemas marinos acuáticos de México*. B. Hernández y G. Gaxiola (Eds.). INE. México. pp 29-42.
- Ordoñez, J. A. B. 2008. Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la región Purépecha. Tesis de Doctorado. Instituto de Ecología, UNAM. Distrito Federal, México. 140 p.
- Ortega-Huerta, M. A. y A. T. Peterson. 2008. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79: 205-216.
- Pasini, A. 2005. From observation to simulations: a conceptual introduction to weather and climate modeling. World Scientific Publishing. E.U.A. 201 p.
- PCMDI. 2007. Climate Model Documentation, References, and Links. http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/model_documentation/ipcc_model_documentation.php. (28 de diciembre de 2009).
- Peralta-Fabi. 2000. Fluidos: apellidos de líquidos y gases. Fondo Cultura Económica. La Ciencia para todos No. 115. México, D.F. 151 p.

- Pérez L., J. L. 2001. Variabilidad climática regional del altiplano central de México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM. Distrito Federal, México. 91 p.
- Peters, D. y D. Stockwell. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *Int. J. Geographical Information Science* 13(2): 143 – 158.
- Phillips, S. J., M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(2006): 231 – 259.
- Pinto, E., R. C. Kay y A. Travers. 2008. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. UNFCCC. 228 p.
- PROFAUNA. 2010. Sitio Web <http://www.profauna.org.mx/cuencas.pdf>. (1 de junio de 2010).
- PRTR-España. 2007. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. <http://www.prtr-es.es/>. (20 de enero de 2010).
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi y K.E. Taylor. 2007. Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Estados Unidos de América. pp 589 – 662.
- Reader, C. 2007. Climate Models and Global Climate Change. Discovery Guides. *ProQuest* December 2007. pp. 1-13.
- Robinson, A. B., N. E. Robinson y W. Soon. 2007. Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide. *Journal of American Physicians and Surgeons* 12 (3): 79-90.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, L. Kornblueh, U. Schlese, U. Schulzweida, I. Kirchner, E. Manzini, A. Rhodin y A. Tompkins. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. MPIM. Report No. 349. Alemania. 127 p.

- Rosas, J. C. 2008. Ecogeografía del género *Pinus* (Linnaeus, 1753) en la subcuenca Tecuantepec – Apulco, México. Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN. Distrito Federal, México. 104 p.
- Ruiz, R. 2009. Deforestación y clima: aproximación al análisis regional y modelado local en la región de la mariposa monarca, México. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México.
- Rummukainen, M. 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIREs Climate Change*. Vol.1, Issue 1. pp 82-96.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sánchez, M. T. y M. Martínez. 2000. La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos ante el cambio climático global. *En: México, una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. C. Gay (Comp.). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp. 1 – 17.
- Sánchez-González, A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14 (1), 2008: 107-120.
- Schoof, J. T., D. W. Shin, S. Cocke, T. E. La Row, Y. K. Lim y J. J. O'Brien. 2009. Dynamically and statistically downscaled seasonal temperature and precipitation hindcast ensembles for the southeastern USA. *International Journal of Climatology*. 29: 243-257.
- Seinfeld J. H. y S. N. Pandis. 2006. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc. 1232 p.
- SEMARNAT. 2005. Informe de la situación del medio ambiente en México. SEMARNAT-UNDP. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/. (20 de abril de 2010).
- SMN. 2009. <http://smn.cna.gob.mx/>. (25 de noviembre de 2009).
- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1 – 10.

- Socolow, R. H. 2005. Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra. *Investigación y Ciencia*, Septiembre 2005. 348: 22-29.
- Stewart, J. 2001. Cálculo de una variable. Trascendentes tempranas. 4a. ed. Thomson Learning. Colombia. 639 p.
- Stott, P. A., J. A. Lowe, P. Thorne, C. Durman, T. C. Johns y J. C. Thelen. 2006. Transient climate simulations with the HadGEM1 climate model: causes of past warming and future climate change. *Journal of Climate* 19: 2763-2782.
- Tejada-Martínez, A., C. Conde, L. Conde, T. García, M. E. Guadarrama, A. Gutiérrez, E. López, V. Magaña, C. A. Ochoa, G. V. Salas, S. Salazar y C. M. Welsh. 2008. Guía para la elaboración de programas estatales de acción ante el cambio climático. INE, Universidad Veracruzana, CCA. México. 83 p.
- Townsend, C. R., Begon M. y J.L. Harper. 2008. Essentials of ecology. 3a ed. Wiley-Blackwell. 532 p.
- Trotta, N., J. M. Lobo y F. J. Cabrero. 2008. Distribución conocida y potencial de las especies de *Geotrupinae* (Coleoptera: *Scarabaeoidea*) en México. *Act. Zool. Mex.* 24 (02): 39 – 65.
- UDG. 2009. Modelo WRF. <http://www.udg.mx/wrf/> . (2 de diciembre de 2009).
- Valencia, S., J. Jiménez y G. Flores. 2004. La colonización del medio terrestre por las plantas. *Ciencias*. Enero- Marzo 73: 14-26.
- Villanueva, J., J. Cerano, V. Constante, P. Fulé y E. Cornejo. 2009. Variabilidad hidroclimática histórica de la Sierra Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3): 45-64.
- Villarreal, J. 2001. Flora de Coahuila. Listados de México XXIII. Instituto de Biología. UNAM. México. 138 p.
- Villarreal, J. y D. Encina. 2005. Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes, México. *Acta Botánica Mexicana*. Enero (70): 1 – 46.
- Villers-Ruiz, L. y I. Trejo-Vázquez. 1998. Climate change on Mexican forests and natural protected areas. *Global Environmental Change*. 8 No. 2. pp. 141-157.
- Villers-Ruiz, L. y I. Trejo-Vázquez. 2000. El cambio climático y la vegetación en México. *En: México, una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. C. Gay

(Comp.). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. pp. 58-72.

- Villers-Ruiz, L., I. Trejo-Vázquez, E. Martínez-Meyer, S. Sánchez-Colón, E. Calixto-Pérez, R. Vázquez. 2009. Biodiversidad. Reporte Final del proyecto: Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, al 2030 y 2050; Evaluación de la Vulnerabilidad Y Opciones de Adaptación de los Asentamientos Humanos, la Biodiversidad y los Sectores Ganadero, Forestal y Pesquero, ante los Impactos de la Variabilidad y el Cambio Climáticos; y Fomento de Capacidades y Asistencia Técnica a Especialistas Estatales que Elaborarán Programas Estatales de Cambio Climático. INE/UNAM. México, DF. 26 pp. [http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/documentos/reportes/InformeFinalBIODIVERSIDAD\[1\].pdf](http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/documentos/reportes/InformeFinalBIODIVERSIDAD[1].pdf). (10 febrero de 2010).
- Villordo, J. A. 2009. Distribución y estado de conservación del jaguar (*Panthera onca*) en San Luis Potosí, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 84 p.
- Wallace, J. M. y P. V. Hobbs. 2006. Atmospheric Science: An Introductory Survey. 2 ed. Elsevier. E. U. A. 483 p.
- White, M. A., N. Brunsell y M. D. Schwartz. 2003. Vegetation phenology in global change studies. *In*: Phenology, an integrative environmental science. M. D. Schwartz (ed.). Kluwer Academic Publishers. pp. 453-466.
- WorldClim. 2010. <http://www.worldclim.org/>. (25 de enero de 2010).
- WRF. 2009. Weather Research and Forecasting. <http://www.wrf-model.org>. (2 de diciembre de 2009).
- Yee, T. W. y N. D. Mitchell. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* 2: 587-602.