

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**DINÁMICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE *PICEA CHIHUAHUANA* EN MÉXICO ANTE
LA RESPUESTA AL CAMBIO CLIMÁTICO**

POR:

M.C. VÍCTOR MANUEL AGUILAR SOTO

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR IN PHILOSOPHIA CON ÁREA MAYOR EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**



Dinámica de la distribución de *Picea chihuahuana* en México ante la respuesta al cambio climático. Disertación presentada por Víctor Manuel Aguilar Soto como requisito parcial para obtener el grado de Doctor in Philosophia, ha sido aprobada y aceptada por:

Ph. D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

Ph. D. Felipe Alonso Rodríguez Almeida
Encargado del Despacho de la Secretaría de Investigación y Posgrado

D. Ph. Agustín Corral Luna
Coordinador Académico

D. Ph. Carmelo Pinedo Álvarez
Presidente

5 Diciembre 2017.

Fecha

Comité:

D. Ph. Carmelo Pinedo Álvarez
Dr. Marín Pompa García
Dr. Martín Martínez Salvador
Dr. Eduardo Santellano Estrada
Ph. D. Alicia Melgoza Castillo

© Derechos Reservados
VÍCTOR MANUEL AGUILAR SOTO
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO FRANCISCO
R. ALMADA KM. 1, CHIHUAHUA,
CHIH., MÉXICO C.P. 31453
DICIEMBRE 2017

CURRICULUM VITAE

El autor nació el 9 de marzo de 1986 en Los Charcos, Mezquital, Durango, México.

- | | |
|-----------|--|
| 2004-2008 | Estudios de Licenciatura en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Juárez del Estado de Durango. |
| 2009-2011 | Estudios de Maestría en el área de Manejo de Recursos Naturales de la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. |
| 2013-2015 | Estudios de Doctorado en el área de Manejo de Recursos Naturales de la Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad Autónoma de Chihuahua. |

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a mis Padres por darme la vida, brindarme el apoyo y darme la oportunidad de permitirme realizar y llevar a cabo una vez más un logro de gran trascendencia como lo es en mi formación académica y personal.

Me permito dar un especial agradecimiento a CONACYT por brindarme el sustento económico, medio por el cual fue posible llevar a cabo el proceso y concluir mis estudios, como beneficio, se ha fortalecido el aspecto académico en mi formación profesional como investigador que me permitirá contribuir a las necesidades de conocimiento en el ramo; también en mi formación personal gracias a las experiencias del proceso académico nutridas por el proceso de aprendizaje mediante el análisis y la búsqueda del conocimiento.

También agradezco a los proyectos Sistema de Monitoreo Satelital y Terrestre de los Pastizales en el estado de Chihuahua apoyados por SAGARPA-Gobierno del estado de Chihuahua y Unión Ganadera Regional de Chihuahua y a la Red de colaboración Sierra Madre por el apoyo para los muestreos de campo. En especial al Proyecto Tarahumara Sustentable que a través de la gestión de WWF en coordinación con CONANP, PNUMA y GEF.

A todos y cada uno de mis asesores que fueron parte importante del desarrollo de mi formación académica y personal, gracias por sus aportaciones tanto técnicas como de experiencias vividas, Agradezco Infinitamente a: al Dr. Carmelo Pinedo Álvarez, a la Dra. Alicia Melgoza, al Dr. Santellano Estrada, al Dr. Martin Martínez y al Dr. Marin Pompa.

También agradezco a todos y a cada uno de mis amistades, que de manera valiosa me dieron motivación contribuyeron y han contribuido no solo la conclusión de mis estudios sino en la formación personal, de corazón agradezco todos y cada uno de ellos: a Carla Chacón, Martin Juárez, Celia Chávez, Claudia Pérez, Magaly Cabral, Esmeralda Peña, Octavio Corleone, Ziury Ortiz.

RESUMEN GENERAL

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Picea chihuahuana* Y SU RESPUESTA AL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

POR:

M. C. VÍCTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Doctor in Philosophia en Producción Animal

Universidad Autónoma de Chihuahua

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Presidente: D. Ph. Carmelo Pinedo Álvarez

Picea chihuahuana es una especie endémica, relictual y en peligro de extinción. Los objetivos fueron: desarrollar modelos de distribución potencial de *P. chihuahuana* a tres escalas de paisaje (local, estatal y nacional); y analizar la influencia de variables climáticas en la distribución de *P. chihuahuana* bajo escenarios climáticos. Se utilizaron 38 registros de presencia de *P. chihuahuana* y 19 variables climáticas obtenidas de WordClim. Las variables tipo de suelo, tipo de vegetación, altitud, pendiente, exposición y distancia a ríos sólo se utilizaron para cumplir una parte del primer objetivo. En el análisis a escala local (30 m de resolución), se utilizaron el modelo MaxEnt y el método de sobre posición temática en SIG. En los análisis a escalas estatal y nacional (1 km de resolución) sólo se utilizó MaxEnt. Para cumplir el segundo objetivo se realizó un análisis multivariado para analizar la variabilidad climática de *P. chihuahuana* y las proyecciones a escenarios paleoclimáticos (Ultima Máxima Glaciación y Holoceno Medio) y a futuro (2050 y 2070). MaxEnt generó mapas

con alta capacidad predictiva ($AUC > 0.97$). En el primer estudio, la distribución de *P. chihuahuana* estuvo condicionada por tipo de vegetación y la temperatura mínima a escala nacional y estatal. A escala local, los dos modelos estimaron áreas similares; las variables con mayor importancia fueron tipo de vegetación, exposición y distancia a los flujos de agua. En el segundo estudio, el análisis multivariado evidenció que existen diferencias en la distribución actual de las poblaciones del sur, centro y norte. Las proyecciones paleoclimáticas mostraron una distribución amplia de *P. chihuahuana*. En las proyecciones a futuro, las poblaciones disminuyeron bajo forzamientos radiativos bajos; en los altos se evidenció la desaparición de *P. chihuahuana* para los períodos 2050 y 2070. Estos resultados pueden apoyar las estrategias de regeneración con sitios bien seleccionados y con una conservación ex situ junto con la migración asistida en respuesta al cambio climático.

GENERAL ABSTRACT

POTENTIAL DISTRIBUTION OF *Picea chihuahuana* AND ITS RESPONSE TO CLIMATE CHANGE IN THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MEXICO

BY:

VICTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Picea chihuahuana is endemic, relictual and endangered species. The objectives were: develop models of potential distribution of *P. chihuahuana* three landscape scales (local, state and national); and analyze the influence of climatic variables and project under climate change scenarios distribution of *P. chihuahuana*. 38 records of *P. chihuahuana* and 19 climatic variables obtained from WorldClim were used. The variables soil type, vegetation type, elevation, slope, exposure and distance to water flows only be used to meet part of the first objective. In the first target; at local scale (30 m resolution) distribution with MaxEnt v3.3.3k was estimated and thematic overlay; while state and national scale (1 km resolution) only MaxEnt was used. To meet the second objective, a multivariate analysis was performed to analyze climate variability of *P. chihuahuana* and projections paleoclimatic scenarios (Last Glacial Maximum and Middle Holocene) and future (2050 and 2070). MaxEnt generated maps with high predictive ability (AUC > 0.97). In the first study, the distribution of *P. chihuahuana* was mainly conditioned by vegetation and minimum temperature national and state levels. Locally, the two models estimated similar areas; the most important variables were type of vegetation, exposure and distance to water flows. In the second study, multivariate analysis showed that there deference's between populations of the south, center and north. Paleoclimatic

projections showed wide distribution. Future projections fell sharply in the low radiative forcing, while high the disappearance of *P. chihuahuana* 2050 and 2070 was evident.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN GENERAL.....	v
GENERAL ABSTRACT.....	viii
CONTENIDO.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE GRÁFICAS.....	xiv
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Estructuras Forestales en la Sierra Madre Occidental.....	4
Deforestación y Fragmentación Forestal.....	5
Pinabete Espinoso (<i>Picea chihuahuana</i> Martínez).....	6
Respuesta de la Vegetación al Cambio Climático.....	7
Modelos de Distribución de Especies (MDE).....	8
Escenarios de Cambio Climático.....	10
LITERATURA CITADA.....	12
Estudio I. MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE <i>Picea chihuahuana</i> MARTÍNEZ, UNA ESPECIE EN PELIGRO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO.....	19
RESUMEN.....	20
ABSTRACT.....	22
INTRODUCCIÓN.....	23

MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
Datos.....	26
Métodos de Modelación.....	26
Evaluación de los Mapas de Distribución.....	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
Escala Nacional.....	31
Escala Estatal.....	36
Escala Local.....	36
Implicaciones.....	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
LITERATURA CITADA.....	51
Estudio II. POBLACIONES DE <i>Picea chihuahuana</i> BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	55
RESUMEN.....	56
ABSTRAC.....	57
INTRODUCCIÓN.....	59
MATERIALES Y MÉTODOS.....	62
Área de Estudio.....	62
Hábitat de <i>Picea chihuahuana</i>	62
Fuente y Registro de Datos.....	63
Diferencias y Similitudes entre Poblaciones.....	63
Análisis de componentes principales (ACP).....	63
Análisis clúster.....	64

Análisis discriminante.....	64
Selección de Variables Climáticas.....	64
Modelos de Distribución de Especies.....	65
Modelo de Distribución Actual.....	65
Proyecciones Paleoclimáticas de <i>Picea chihuahuana</i>	68
Estimación de la Superficie Actual de <i>P. chihuahuana</i>	69
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
Diferencias y Similitudes entre Poblaciones.....	70
Modelos de Distribución Actual.....	77
Resolución 30 segundos.....	77
Resolución 2.5 minutos.....	78
Distribución Potencial Paleoclimática Estimada.....	85
Tendencia y distribución de <i>P. chihuahuana</i> de acuerdo al modelo MIROC-ESM.....	85
Tendencia y distribución de <i>P. chihuahuana</i> de acuerdo al modelo CCSM4.....	88
Distribución Potencial Futura Pronosticada para el 2050 y 2070..	94
Escenarios de <i>Picea chihuahuana</i> a 2050.....	95
Escenarios de <i>Picea chihuahuana</i> a 2070.....	98
Superficie Actual, Estimación de Potencial Actual y de Escenarios.....	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
LITERATURA CITADA.....	106

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Las variables de entrada para el modelo MaxEnt para <i>Picea chihuahuana</i> Martínez a escala nacional, estatal y local.....	28
2	Contribución de las variables de la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México a escala nacional.....	32
3	Contribución de las variables de la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez a escala estatal en Chihuahua, México.....	37
4	Áreas de la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez a escala local estimada por MaxEnt y el método de superposición.....	41
5	Contribución de las variables a la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez: modelo a escala local.....	43
6	Correlaciones lineal de las variables climáticas para las poblaciones de <i>Picea chihuahuana</i>	66
7	Variables climáticas seleccionadas a partir del análisis de correlaciones.....	67
8	Valores de los vectores de cada variable que forman los componentes principales asociado a las poblaciones de <i>Picea chihuahuana</i>	71
9	Distancia de Mahalanobis entre grupos de <i>Picea chihuahuana</i>	75
10	Estadísticos descriptivos de variables climáticas por grupos de poblaciones estimadas mediante el análisis de varianza múltiple.....	76
11	Contribución de las variables del modelo de distribución potencial actual de <i>Picea chihuahuana</i> de 30 segundos de resolución.....	79
12	Contribución de las variables del modelo de distribución potencial actual de <i>Picea chihuahuana</i> de 2.5 minutos de resolución.....	82
13	Ajuste de los modelos al pasado y las variables climáticas de	86

	mayor contribución.....	
14	Distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> por el modelo MIROC-ESM en los periodos UMG, HM y para la actual.....	89
15	Comparación paleo climática de las áreas de potencialidad alta de <i>Picea chihuahuana</i>	101

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Curvas de respuesta de las variables que más contribuyeron en la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México (a= temperatura mínima del mes más frío (Bio6), b= tipos de suelo, c= tipos de vegetación, d= precipitación del mes más seco (Bio19)): modelo a escala nacional.....	33
2	Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México a escala nacional.....	35
3	Curvas de respuesta de las variables que más contribuyeron a la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México (a= temperatura mínima del mes más frío (Bio14), b= tipo de vegetación, c=tipo de suelo y d=precipitación del mes más seco (BIO1)): modelo a escala estatal.....	38
4	Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para <i>Picea chihuahuana</i> Martínez a escala estatal (Chihuahua, México).....	40
5	Curvas de respuesta de las variables que más contribuyeron en la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México (a=Tipo de vegetación, b= Exposición, c=Distancia a los flujos de agua, d= Precipitación anual): modelo a escala local.....	44
6	Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para <i>Picea chihuahuana</i> Martínez a escala local. TMA= temperatura media anual y DFA= Distancia a los flujos de agua.....	46
7	Jackknife de las variables analizadas para el modelo de distribución potencial actual de 30 segundos de resolución.....	80
8	Curvas de respuesta de las variables de mayor contribución ante las probabilidades de ocurrencia.....	81
9	Jackknife de las variables de analizadas para el modelo de distribución potencial actual de 2.5 minutos de resolución.....	83
10	Tendencia del áreas de distribución de <i>Picea chihuahuana</i> en los periodos de la Ultima máxima glaciación y para el	

	Holoceno Medio bajo el modelo MIROC-ESM.....	90
11	Tendencia del áreas de distribución de <i>Picea chihuahuana</i> en los periodos de la Ultima máxima glaciación y para el Holoceno Medio bajo el modelo CCSM4.....	93
12	Tendencia de las proyecciones a 2050 y 2070 de la distribución de las áreas de potencialidad alta de <i>Picea chihuahuana</i> con los modelos HadGEM-ESM y CCSM4.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Área de estudio para <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México.....	29
2	Mapa de la distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en México: Modelo a escala nacional.....	34
3	Mapa de la distribución potencial de la <i>Picea chihuahuana</i> Martínez en Chihuahua, México: modelo a escala estatal.....	39
4	Mapas de áreas de distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> a escala local mediante: (a) el método de superposición y (a) MaxEnt.....	45
5	Variabilidad de las poblaciones de <i>Picea chihuahuana</i> por los dos primeros componentes.....	72
6	Agrupación jerárquica de poblaciones de <i>Picea chihuahuana</i> con base en el análisis clúster con 19 variables climáticas.....	74
7	Áreas de distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> bajo el modelo MIROC-ESM; (a) última máxima glaciación, UMG y (b) Holoceno Medio, HM	87
8	Áreas de distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> con el modelo CCSM; para los periodos (a) última máxima glaciación, UMG y (b) Holoceno Medio, HM.....	91
9	Proyecciones de distribución potencial de <i>Picea chihuahuana</i> a 2050 bajo el modelo CCSM4; con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.....	96
10	Proyecciones de distribución potencial de <i>P. chihuahuana</i> a 2050 bajo el modelo HADGEM2 ES: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5..	97
11	Proyecciones de distribución potencial de <i>P. chihuahuana</i> a 2070 bajo el modelo CCSM4: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.....	99
12	Proyecciones de distribución potencial de <i>P. chihuahuana</i> a 2070 bajo el modelo HADGEM2 ES: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5..	100

INTRODUCCIÓN GENERAL

La Sierra Madre Occidental alberga una de las áreas boscosas más extensas de Norteamérica. Sus ecosistemas tienen una gran importancia biológica, ecológica e hidrológica que se conjugan para presentar una alta biodiversidad y gran número de especies endémicas (Descroix *et al.*, 2004). Además de servicios eco sistémicos diversos, sus recursos naturales sustentan actividades importantes como el aprovechamiento forestal, el turismo y la industria de minerales, entre otros (Chacon, 2016). A pesar de estas riquezas naturales, su biodiversidad y servicios eco sistémicos están siendo afectados por procesos de degradación de los bosques, deforestación así como por la disminución de sus recursos hídricos y contaminación del ambiente (Santana y Salas, 2007). Estos impactos afectan el hábitat de especies en riesgo o amenazadas que han acelerado la pérdida genética por medio de la destrucción, degradación y fragmentación de la estructura forestal (Quiñones-Pérez *et al.*, 2015).

El pinabete espinoso (*Picea chihuahuana* Martínez) es una especie endémica y en peligro de extinción con un hábitat restringido a pequeñas poblaciones sobre la Sierra Madre Occidental de Chihuahua y Durango (Ledig *et al.*, 2000; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014). Situación por la que es considerada como prioritaria para su conservación (SEMARNAT, 2010). Además de los impactos antropogénicos, la declinación de la abundancia de *P. chihuahuana* se basa en especulaciones sobre incrementos en la temperatura del holoceno que provocó una rápida disminución en sus poblaciones (Lozano-García *et al.*, 1993; Rzedowski, 2006). Este suceso sugiere que el cambio climático superó la

capacidad de adaptación de esta especie por el corto tiempo en que sucedió. Por consecuencia, la especie se restringe a áreas dispersas sobre hábitat protegidos (Ledig *et al.*, 1997). Algunas especies están respondiendo al cambio climático a través de cambios detectables en sus distribuciones (Root *et al.*, 2003).

En la conservación y restauración de especies en peligro de extinción es necesario determinar la disponibilidad de hábitats apropiados en la actualidad (Phillips *et al.*, 2009) y la proyección de escenarios ante las variaciones climáticas (Heikkinen *et al.*, 2006; Elith y Leathwick, 2009; Ledig, 2012). En los últimos años, los modelos de distribución de especies se han utilizado para determinar la vulnerabilidad mediante la cuantificación y la detección de áreas potenciales de especies bajo alguna amenaza (Elith *et al.*, 2011; Arribas *et al.*, 2012). La necesidad de recurrir a estas tecnologías es debido a la amenaza que presentan las especies en riesgo por las actividades antropogénicas, la ocurrencia de fenómenos naturales (Santana y Salas, 2007; Singer *et al.*, 2016) y la influencia del cambio climático con notables modificaciones en los últimos 30 años (IPCC, 2013).

Los modelos de distribución de especies (SDM) ayudan a identificar la vulnerabilidad de las especies mediante la detección de áreas adecuadas para su desarrollo y poder hacer frente al cambio climático ambiental global (Ferrier y Guisan, 2006). Estos son modelos empíricos basados en las correlaciones geográficas entre la distribución de especies y el clima y han sido un enfoque importante para anticipar el desplazamiento de las especies (Somero, 2010).

La presente investigación se realizó considerando dos estudios de caso: el primero se orientó al modelado de la distribución potencial de *P. chihuahuana* Martínez. El objetivo fue modelar la distribución potencial de *P. chihuahuana* a escalas local, estatal y nacional. El segundo estudio analizó la influencia de la variación climática en la distribución de las poblaciones de *P. chihuahuana* y su comportamiento bajo proyecciones de cambio climático al pasado y a futuro.

REVISIÓN DE LITERATURA

Estructuras Forestales en la Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental (SMO) alberga una de las áreas boscosas más extensas de Norteamérica, extendiéndose desde la frontera con Estados Unidos hasta el norte de Jalisco. Sus ecosistemas tienen una gran importancia biológica, ecológica e hidrológica que se conjugan para presentar una alta biodiversidad y alto número de especies endémicas (Descroix *et al.*, 2004). El área es un corredor biológico de gran importancia para especies boreales así como para las tropicales de montaña (Rzedowski, 2006). Además, provee de servicios ambientales que sustentan actividades como el aprovechamiento forestal, el turismo y la industria de minerales entre otros (Chacon, 2016).

México alberga la más alta diversidad de comunidades de pino-encino, donde la SMO posee la mayor parte de la superficie de bosques templados (González-Elizondo *et al.*, 2012). Como ejemplo, en esta sierra se registran 24 especies de pinos (46 % del nacional), 54 de encinos (34 %), 7 de madroños (100 %) y un lugar importante para la SMO puesto que México ocupa el segundo lugar para encinos a nivel mundial (Torres-Rojo, 2004). Además, esta región presenta la mayor diversidad de asociaciones de pino, encino y madroños (Del Ángel Mobarak, 2012).

Sin embargo, en los últimos años ha aumentado la demanda de productos diversos de los ecosistemas forestales. Estos procesos han presionado hacia una disminución acelerada de los recursos relacionados principalmente con la reducción de densidad de los bosques debido a procesos

de fragmentación de hábitat y otros factores de cambio ambiental global (Linares *et al.*, 2005).

Deforestación y Fragmentación Forestal

La fragmentación es un proceso que ocurre cuando un hábitat original es dividido en aéreas más pequeñas y el aislamiento espacial incrementa. Este proceso es una de las mayores amenazas para la biodiversidad a nivel mundial (Saunders *et al.*, 1991; Lindenmayer y Fischer, 2013). La fragmentación da lugar a tres procesos interrelacionados: pérdida de la vegetación original, subdivisión de la vegetación restante y la introducción de nuevas formas del uso de suelo para sustituir la vegetación perdida (Bennett y Saunders, 2010). La fragmentación de un hábitat es reflejada en la estructura espacial del paisaje en los tamaños y formas de los parches de los fragmentos (Turner *et al.*, 2001). La destrucción del hábitat conduce a la extinción de las especies que dependen de ella, ya que provocan una disminución de la heterogeneidad ambiental local, (Honnay *et al.*, 1999; Jamoneau *et al.*, 2011).

Otro concepto relacionado con el paisaje y la fragmentación son el cambio de uso de suelo. La cobertura del suelo es el más importante recurso natural que involucra el sustrato suelo, agua, flora y fauna asociada (Paudel y Yuan, 2012). Una de las causas principales de la deforestación en México es el cambio de uso de suelo tanto con fines de aprovechamiento maderable o para tierras de cultivo (Kaimowitz y Angelsen, 1998). México ocupa uno de los primeros lugares en tasas de deforestación a nivel mundial (Sarukhán *et al.*, 2009). Las estimaciones de la deforestación en México presentan una pérdida de bosques y selvas ocurrida entre 1990 y 2000 de 354 mil ha anuales en

promedio; en 2000-2005 de 235 mil ha y para 2005-2010 fue de 155 mil ha, con sus respectivas tasas de deforestación de 0.52, 0.35 y 0.24 (Gálvez *et al.*, 2010). México es uno de los países que ha logrado disminuir la pérdida de la superficie forestal y se estima que existen 16 millones de hectáreas de terrenos forestales susceptibles a la reforestación (ITAM, 2010).

La pérdida de los bosques, además de reflejarse en una reducción en la superficie, productividad y biodiversidad tiene mayor efecto en ciertas especies y ecosistemas o bosques frágiles (Sarukhán *et al.*, 2009; Calderon-Aguilera *et al.*, 2012). Estas modificaciones del paisaje llegan a provocar el aislamiento biológico de las poblaciones (Santiago-Pérez *et al.*, 2012). Los mayores impactos recaen en especies endémicas, bajo amenaza o en peligro de extinción (SEMARNAT, 2010) e incluso las de carácter relictual como el caso de *P. chihuahuana* (Gordon, 1968).

Pinabete Espinoso (*Picea chihuahuana* Martínez)

El pinabete espinoso (*P. chihuahuana*) es una especie endémica y relictual, su distribución se limita al norte de México en los estados de Chihuahua y Durango (Narváez, 1984; Jaramillo-Correa *et al.*, 2006; Aguilar-Soto *et al.*, 2015). El uso de esta especie es variado: como árbol de navidad y extracción de celulosa; además, ecológicamente ofrece gran variedad de beneficios como hábitat de la cotorra serrana, protección de suelos contra erosión además de ser una importante especie indicadora. Las poblaciones de *P. chihuahuana* actualmente se localizan en condiciones climáticas específicas, fragmentadas en pequeñas áreas (Sánchez-Córdova, 1984; Mata, 2000) con 38 poblaciones con alrededor de 40,000 individuos (Ledig *et al.*, 2000). Debido a

su situación se ha clasificado en peligro de extinción (SEMARNAT, 2010). Las causas principales de su actual tamaño de poblaciones y distribución se desconocen, aunque se le atribuyen a poblaciones geográficamente aisladas, una reproducción irregular debido a la distribución heterogénea de edades en la población y escasa regeneración natural (Gordon, 1968). Aunado a esto, existe una tala ilegal para aprovechar su madera y celulosa, así como cortes en forma clandestina para utilizarlos como árboles de navidad (Mata, 2000).

Respuesta de la Vegetación al Cambio Climático

La distribución de la vegetación en ausencia de presiones competitivas, generalmente está determinada con mayor frecuencia por el clima. Además, el cambio climático en conjunto con las actividades antropogénicas afectan las especies y los ecosistemas (Singer *et al.*, 2016). De igual manera, los bosques influyen en el clima a través de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la energía del planeta, el ciclo hidrológico y la composición de la atmosfera (Bonan, 2008). Los cambios recientes del clima global y regional están bien documentados y en general se presenta un aumento de la temperatura media anual (Hansen *et al.*, 2012).

En los últimos 30 años se ha presentado el clima más cálido, y es probable que los decenios recientes sean los más cálidos para el hemisferio norte en los últimos 1400 años (IPCC, 2013). Estos efectos del clima es posible que produzca fuertes impactos directamente sobre los bosques (Kirilenko y Sedjo, 2007) con modificaciones en el crecimiento y la distribución de las especies arbóreas (Linares y Tíscar, 2010). La resiliencia de los ecosistemas a los cambios actuales y proyecciones futuras del clima es de gran preocupación

ya que los bosques por sus servicios ambientales regulan el ambiente (Hassan *et al.*, 2005; Peters *et al.*, 2013). Bajo este contexto es necesario evaluar la vulnerabilidad del crecimiento de los arboles ante las variaciones climáticas en función del impacto climático y la sensibilidad y capacidad de adaptación de los arboles (Lindner *et al.*, 2010).

El cambio climático ha influido en la reducción de las áreas de distribución de especies, disminución de algunas poblaciones e incluso la extinción de algunas especies, debido a que exceden las habilidades de adaptación (Smith, 1997). Evidencias polinológicas señalan la presencia de *Picea* hace 10,000 años en los valles de México y Puebla; su desaparición es atribuido a las fluctuaciones del cambio climático de esos tiempos (Lozano-García *et al.*, 1993; Rzedowski, 2006). La persistencia de éste género indica que es un relictos a causa de la última glaciación, dado que otras especies que fueron exitosas están extintas, como *P. critchfieldii* en el norte de América (Jackson y Weng, 1999). La extinción o declinación de poblaciones de diferentes especies están influenciadas por las variaciones climáticas y actividades humanas principalmente (Mahlman, 1998). Simulaciones del clima pronostican incrementos de temperatura con rangos mínimos de 0.3 a 1.7 °C y rangos extremos de hasta 2.6 a 4.8 °C (IPCC, 2013), para *P. chihuahuana* es una amenaza ya que es especie susceptible a la desaparición

Modelos de Distribución de Especies (MDE)

La base de los MDE radica en el concepto de nicho (Hutchinson, 1957) o conjunto de variables físicas que definen el nicho fundamental de una especie. Por consecuencia, los modelos de nicho ecológico utilizan asociaciones entre

variables ambientales y la localización de las especies conocidas para definir las condiciones ambientales donde de las poblaciones se pueden desarrollar adecuadamente (Guisan y Thuiller, 2005; Franklin, 2009). Recientemente se han desarrollado una gran variedad de modelados con el objetivo de predecir la probabilidad de ocurrencia de las especies en función de las variables ambientales (Guisan y Zimmermann, 2000; Hirzel y Le Lay, 2008; Elith y Leathwick, 2009) de hábitat actuales y potenciales (Mateo *et al.*, 2011). Los modelos de distribución para su generación pueden emplear cualquier clasificador estadístico, dependiendo de la disponibilidad de datos de ocurrencia o abundancia conocidos (Elith *et al.*, 2006). Los modelos cuantitativos modernos y los mapeos de distribución de especies surgieron con la aplicación de modelos de regresión lineal y análisis de función discriminante, que dieron lugar a nuevos métodos de regresión con mejores tratamientos de errores de distribución asociados a los datos de presencia-ausencia (Phillips y Dudík, 2008; Elith y Leathwick, 2009). Estos modelos han evolucionado de simples comparaciones ambientales (BIOCLIM, DOMAIN), a modelos más complejos como el ajuste de modelos no lineales; los modelos lineales generalizados GLM; los modelos aditivos generalizados GAM; modelado de máxima entropía MaxEnt (Elith y Graham, 2009; Mateo *et al.*, 2011).

MaxEnt usa el algoritmo de máxima entropía que logra resultados robustos en términos de la proyección espacial de la distribución principalmente cuando se cuenta con pocos registros de presencia (Phillips *et al.*, 2006; Pearson *et al.*, 2007; Elith *et al.*, 2011). La predicción de la distribución de las especies se centran en diversas aplicaciones en ecología, agricultura,

horticultura, forestería con fines de conservación y además juega un papel importante en la evaluación de impacto del cambio global sobre los ecosistemas (Mbatudde *et al.*, 2012; Bucklin *et al.*, 2015). Su uso ha crecido en acciones orientadas a la conservación relacionadas con las invasiones biológicas, la identificación de hábitat, la translocación de especies en peligro de extinción y la identificación de áreas de reservas (Richardson y Whittaker, 2010; Guisan *et al.*, 2013; Pouteau *et al.*, 2015). Además, permiten realizar proyecciones para predecir el espacio geográfico-ecológico de las especies hacia el pasado o hacia futuro (Guisan y Thuiller, 2005; Wilson *et al.*, 2005; Mateo, 2008; Garcia *et al.*, 2014).

Escenarios de Cambio Climático

El cambio climático es un problema de naturaleza global que involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial (Martínez *et al.*, 2004). El incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero aumenta la absorción atmosférica de la radiación emitida, como consecuencia originan un forzamiento radiativo del sistema climático que causa cambios a nivel global (IPCC, 2007). De los gases de efecto invernadero, el CO₂ ha aumentado significativamente en los últimos 15 años, con estimaciones de 0,3 W m⁻² por decenio y con mayores concentraciones del 2005 al 2011 (Ciais *et al.*, 2013). La integración de concentraciones de CO₂ y los gases de efecto invernadero en modelos ha permitido elaborar escenarios futuros del clima que tratan de simular procesos de circulación atmosférica para comparar el cambio climático con condiciones normales (Magaña, 2004). Las

simulaciones de los modelos contemplan toda una gama de posibles condiciones futuras mediante el uso de concentraciones de CO₂ duplicados y cuadruplicados de 2000 al 2100 (IPCC, 2007). Los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) contemplados en el quinto informe de IPCC definieron cuatro nuevos escenarios denominados trayectorias de concentraciones representativas (RCP). Que han definido cuatro escenarios nuevos que son RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 expresadas en W m⁻²; correspondientes a 421, 538, 670 y 936 ppm de CO₂ (Moss *et al.*, 2010; Ciais *et al.*, 2013).

Los Modelos del Sistema Terrestre (ESM) incluyen evaluaciones entre los procesos físicos químicos y bio-geo-químicos del sistema climático, tomando en cuenta los gases de efecto invernadero. Para este caso se consideran como modelos de referencia el HadGEM2-ES y el MIROC-ESM. Flato *et al.* (2013) los diferenciaron de los Modelos de Circulación General Océano-Atmosfera (AOGCM) que solo incluyen las interacciones de los procesos físicos entre atmosfera, océano, superficie terrestre y el hielo de mar. Este modelo está representado por el Community Climate System Model 4 (CCSM4).

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Soto, V., A. Melgoza-Castillo, F. Villarreal-Guerrero, C. Wehenkel y C. Pinedo-Alvarez. 2015. Modeling the Potential Distribution of *Picea chihuahuana* Martínez, an Endangered Species at the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*. 6:692-707.
- Arribas, P., P. Abellán, J. Velasco, D. T. Bilton, J. M. Lobo, A. Millán y D. Sánchez-Fernández. 2012. La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad. *Revista Ecosistemas*. 21:79-84.
- Bennett, A. F. y D. A. Saunders. 2010. Habitat fragmentation and landscape change En *Conservation biology for all*. Sodhi, N. S. y P. R. Ehrlich, Eds. Oxford University Press. Oxford, USA.
- Bonan, G. B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*. 320:1444-1449.
- Bucklin, D. N., M. Basille, A. M. Benschoter, L. A. Brandt, F. J. Mazzotti, S. S. Romañach, C. Speroterra y J. I. Watling. 2015. Comparing species distribution models constructed with different subsets of environmental predictors. *Divers. Distrib.* 21:23-35.
- Calderon-Aguilera, L. E., V. H. Rivera-Monroy, L. Porter-Bolland, A. Martínez-Yrizar, L. B. Ladah, M. Martínez-Ramos, J. Alcocer, A. L. Santiago-Pérez, H. A. Hernandez-Arana y V. M. Reyes-Gómez. 2012. An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps. *Biodivers. Conserv.* 21:589-617.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway y M. Heimann. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Chacon, C. O. K. 2016. Impacto de la actividad minera y forestal en el desarrollo sustentable de comunide en Ocampo, Chihuahua. *Disertación doctoral. Facultad de Zootecnia y Ecología, Universidad Universidad Autónoma de Chihuahua, México.*
- Del Ángel Mobarak, G. A. 2012. La Comisión Nacional Forestal en la Historia y el Futuro de la Política Forestal en México. *Comisión Nacional Forestal (México).*

- Descroix, L., J. González-Barrios y J. Estrada-Avalos. 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Gomez Palacio, Durango. Mexico.
- Elith, J. y C. H. Graham. 2009. Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*. 32:66-77.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick y A. Lehmann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29:129-151.
- Elith, J. y J. R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40:677.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee y C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17:43-57.
- Ferrier, S. y A. Guisan. 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *J. Appl. Ecol.* 43:393-404.
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S. C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori y V. Eyring. 2013. Evaluation of climate models. En *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Franklin, J. 2009. *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press. USA.
- Gálvez, R. O. P. R., R. P. Dávalos, E. S. D. De Jong y B. H. J. O. Álvarez. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales. Informe Nacional México, Forest Resource Assessment (FRA). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- García, R. A., M. Cabeza, C. Rahbek y M. B. Araújo. 2014. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*. 344:1247579.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, J. Tena-Flores, L. Ruacho-González y I. L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Bot. Mex.* 100:351-403.

- Gordon, A. G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. *Ecology*. 49:880-896.
- Guisan, A. y W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol. Lett.* 8:993-1009.
- Guisan, A., R. Tingley, J. B. Baumgartner, I. Naujokaitis-Lewis, P. R. Sutcliffe, A. I. Tulloch, T. J. Regan, L. Brotons, E. McDonald-Madden y C. Mantyka-Pringle. 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecol. Lett.* 16:1424-1435.
- Guisan, A. y N. E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135:147-186.
- Hansen, J., M. Sato y R. Ruedy. 2012. Perception of climate change. *PNAS*. 109:E2415-E2423.
- Hassan, R., R. Scholes y N. Ash. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume 1*. Island Press. Washington.
- Heikkinen, R. K., M. Luoto, M. B. Araújo, R. Virkkala, W. Thuiller y M. T. Sykes. 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Prog. Phys. Geogr.* 30:751-777.
- Hirzel, A. H. y G. Le Lay. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. *J. Appl. Ecol.* 45:1372-1381.
- Honnay, O., M. Hermy y P. Coppin. 1999. Impact of habitat quality on forest plant species colonization. *For. Ecol. Manage.* 115:157-170.
- Hutchinson, G. E. 1957. Cold spring harbor symposium on quantitative biology. Concluding remarks. 22:415-427.
- IPCC. 2013. *Cambio Climático 2013. Bases Físicas. Reporte para tomadores de decisiones*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press. United Kingdom and New York, USA.
- ITAM. 2010. *El sector forestal en México: diagnóstico, prospectiva y estrategia*. Centro de Estudios de Competitividad. Mexico.
- Jackson, S. T. y C. Weng. 1999. Late Quaternary extinction of a tree species in eastern North America. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96:13847-13852.
- Jamoneau, A., G. Sonnier, O. Chabrierie, D. Closset-Kopp, R. Saguez, E. Gallet-Moron y G. Decocq. 2011. Drivers of plant species assemblages in forest patches among contrasted dynamic agricultural landscapes. *J. Ecol.* 99:1152-1161.

- Jaramillo-Correa, J. P., J. Beaulieu, F. T. Ledig y J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. *Mol. Ecol.* 15:2787-2800.
- Kaimowitz, D. y A. Angelsen. 1998. Economic models of tropical deforestation: a review. Cifor. Bogor, Indonesia.
- Kirilenko, A. P. y R. A. Sedjo. 2007. Climate change impacts on forestry. *PNAS.* 104:19697-19702.
- Ledig, F. T. 2012. Climate change and conservation. 8:57-74.
- Ledig, F. T., V. Jacob-Cervantes, P. D. Hodgskiss y T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. 51:1815-1827.
- Ledig, F. T., M. Mápula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López y M. A. Capó-Arteaga. 2000. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. 71-88.
- Linares, J. C. y P. A. Tíscar. 2010. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Tree Physiol.* 30:795-806.
- Linares, M. A. M., E. Jurado y C. L. González. 2005. Efecto del fuego en el establecimiento de *Arctostaphylos pungens* Hbk., en ecosistemas templados semihúmedos de Durango, México. *Madera y Bosques.* 11:35-48.
- Lindenmayer, D. B. y J. Fischer. 2013. Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis. Island Press. Washington, USA.
- Lindner, M., M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbat, J. Garcia-Gonzalo, R. Seidl, S. Delzon, P. Corona y M. Kolström. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259:698-709.
- Lozano-García, M. S., B. Ortega-Guerrero, M. Caballero-Miranda y J. Urrutia-Fucugauchi. 1993. Late Pleistocene and Holocene paleoenvironments of Chalco lake, central Mexico. *Quatern. Res.* 40:332-342.
- Magaña, V. 2004. El cambio climático global: comprender el problema En *Cambio Climático: Una Visión desde México.* Martínez, J., B. A.

Fernández y P. Osnaya, Eds. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. D. F., México.

Mahlman, J. D. 1998. Uncertainties in Projections of Human-Caused Climate Warming. *Science*. 16:18-21.

Martínez, J., B. A. Fernández y P. Osnaya. 2004. Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. D. F., México.

Mata, R. M. 2000. Morfogénesis en *Picea chihuahuana*, a partir de Cultivo de Tejidos de Estructuras Inmaduras. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas, UNAM. D. F., México.

Mateo, R. 2008. Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y optimización de métodos de modelado ecológico. Ph. D. Tesis. Universidad Complutense de Madrid. España.

Mateo, R. G., Á. M. Felicismo y J. Muñoz. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 84:217-240.

Mbatudde, M., M. Mwanjololo, E. K. Kakudidi y H. Dalitz. 2012. Modelling the potential distribution of endangered *Prunus africana* (Hook. f.) Kalkm. in East Africa. *Afr. J. Ecol.* 50:393-403.

Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma y T. Kram. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463:747-756.

Narváez, F. 1984. Contribución al Conocimiento de la Ecología de *Picea chihuahuana*.

Paudel, S. y F. Yuan. 2012. Assessing landscape changes and dynamics using patch analysis and GIS modeling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 16:66-76.

Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura y A. Townsend Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *J. Biogeogr.* 34:102-117.

Peters, E. B., K. R. Wythers, S. Zhang, J. B. Bradford y P. B. Reich. 2013. Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Can. J. For. Res.* 43:939-950.

Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* 190:231-259.

- Phillips, S. J. y M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31:161-175.
- Phillips, S. J., M. Dudík, J. Elith, C. H. Graham, A. Lehmann, J. Leathwick y S. Ferrier. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecol. Appl.* 19:181-197.
- Pouteau, R., É. Bayle, É. Blanchard, P. Birnbaum, J. J. Cassan, V. Hequet, T. Ibanez y H. Vandrot. 2015. Accounting for the indirect area effect in stacked species distribution models to map species richness in a montane biodiversity hotspot. *Divers. Distrib.* 21:1329-1338.
- Quiñones-Pérez, C., S. Simental-Rodríguez, C. Saenz-Romero, J. Jaramillo-Correa y C. Wehenkel. 2014. Spatial genetic structure in the very rare and species-rich *Picea chihuahuana* tree community (Mexico). *Silvae Genet.* 63:149-159.
- Quiñones-Pérez, C. Z., C. Sáenz-Romero y C. Wehenkel. 2015. Genetic diversity and conservation of *Picea chihuahuana* Martínez: A review. *Afr. J. Biotechnol.* 13.
- Richardson, D. M. y R. J. Whittaker. 2010. Conservation biogeography—foundations, concepts and challenges. *Divers. Distrib.* 16:313-320.
- Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig y J. A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*. 421:57-60.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Sánchez-Córdova, J. 1984. *Picea chihuahuana*, una Conífera en Peligro de Extinción. *Rev. Ciencia Forestal*. 9:51-63.
- Santana, L. y J. Salas. 2007. Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.
- Santiago-Pérez, A. L., R. Villavicencio García, J. d. J. Godínez Herrera, J. M. Chávez Anaya y S. L. Toledo González. 2012. Tamaño de fragmentos forestales en el bosque de pino-encino, Sierra de Quila, Jalisco. 3:23-38.
- Sarukhán, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta y J. d. I. Maza. 2009. Capital natural de México, Síntesis: Conocimiento actual,

evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mexico.

Saunders, D. A., R. J. Hobbs y C. R. Margules. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conserv. Biol.* 5:18-32.

SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF).

Singer, A., K. Johst, T. Banitz, M. S. Fowler, J. Groeneveld, A. G. Gutiérrez, F. Hartig, R. M. Krug, M. Liess y G. Matlack. 2016. Community dynamics under environmental change: How can next generation mechanistic models improve projections of species distributions? *Ecol. Model.* 326:63–74.

Smith, J. B. 1997. Setting priorities for adapting to climate change. *Glob. Environ. Chang.* 7:251-264.

Somero, G. 2010. The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine 'winners' and 'losers'. *J. Exp. Biol.* 213:912-920.

Torres-Rojo, J. 2004. Estudio de Tendencias y Perspectivas del Sector Frestal en América Latina al Año 2020. Informe Nacional México. FAO-SEMARNAT. México

Turner, M. G., R. H. Gardner y R. V. O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice: patterns and process. Springer. New York, USA.

Wilson, K. A., M. I. Westphal, H. P. Possingham y J. Elith. 2005. Sensitivity of conservation planning to different approaches to using predicted species distribution data. *Biol. Conserv.* 122:99-112.

ESTUDIO I. MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *PICEA CHIHUAHUANA* MARTÍNEZ, UNA ESPECIE EN PELIGRO EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL, MÉXICO

POR:

Víctor Aguilar-Soto¹, Alicia Melgoza-Castillo¹, Federico Villarreal-Guerrero¹,
Christian Wehenkel² y Carmelo Pinedo-Álvarez¹

¹Departamento de Recursos Naturales, Facultad de Zootecnia y Ecología,
Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Periférico Fco. R. Almada Km 1,
31453 Chihuahua, Chih., México.

²Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado
de Durango, Constitución 404 sur, Zona Centro, CP 34000 Durango, Dgo.,
México.

RESUMEN

MODELADO DE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Picea chihuahuana*

MARTÍNEZ, UNA ESPECIE EN PELIGRO EN LA SIERRA MADRE

OCCIDENTAL, MÉXICO

POR:

M. C. VÍCTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Los Modelos de Distribución de Especies (SDM) permiten identificar áreas para el desarrollo de las poblaciones o comunidades para prevenir las extinciones, especialmente para hacer frente al cambio ambiental global. Este estudio modeló la distribución potencial del *Picea chihuahuana* Martínez, una especie en peligro de extinción, con la aplicación del método de modelado de máxima entropía (MaxEnt), en tres escalas: local, estatal y nacional. Se utilizó un total de 38 datos de presencia de la Sierra Madre Occidental. A escala local, el método MaxEnt se comparó con el método de reclasificación y sobre posición temática en un sistema de información geográfica. MaxEnt generó mapas con una alta capacidad de predicción ($AUC > 0.97$). La distribución de *P. chihuahuana* fue definido por el tipo de vegetación y la temperatura mínima a escalas nacional y estatal. A escala local, los dos modelos empleados estimaron áreas similares para la distribución potencial de la especie; las variables que mejor definieron la distribución de la especie fueron el tipo de vegetación, la exposición y la distancia a los flujos de agua. Las poblaciones de *P. chihuahuana* se presentan en pequeñas superficies, pero los resultados mostraron un hábitat potencial más grande que el área que ocupa en su distribución actual. Estos resultados proporcionan una idea de la disponibilidad

de espacios adecuados para la regeneración de la especie, posiblemente a través de la colonización asistida.

ABSTRACT

MODELING THE POTENTIAL DISTRIBUTION OF *Picea chihuahuana*
MARTÍNEZ, AN ENDANGERED SPECIES AT THE SIERRA MADRE
OCCIDENTAL, MEXICO

BY:

VÍCTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Species distributions models (SDM) help identify areas for the development of populations or communities to prevent extinctions, especially in the face of the global environmental change. This study modeled the potential distribution of the tree *Picea chihuahuana* Martínez, a species in danger of extinction, using the maximum entropy modeling method (MaxEnt) at three scales: local, state and national. We used a total of 38 presence data from the Sierra Madre Occidental. At the local scale, we compared MaxEnt with the reclassification and overlay method integrated in a geographic information system. MaxEnt generated maps with a high predictive capability (AUC > 0.97). The distribution of *P. chihuahuana* is defined by vegetation type and minimum temperature at national and state scales. At the local scale, both models calculated similar areas for the potential distribution of the species; the variables that better defined the species distribution were vegetation type, aspect and distance to water flows. Populations of *P. chihuahuana* have always been small, but our results show potential habitat greater than the area of the actual distribution. These results provide an insight into the availability of areas suitable for the species' regeneration, possibly through assisted colonization.

INTRODUCCIÓN

En la restauración de especies en peligro de extinción, es necesario determinar la disponibilidad de hábitats adecuados (Funk y Richardson, 2002; Rushton *et al.*, 2004; Ledig *et al.*, 2010). En este sentido, los modelos de distribución de especies (SDM) ayudan a identificar los hábitats para el desarrollo de poblaciones de una especie o comunidad para prevenir las extinciones, especialmente para hacer frente al cambio ambiental global (Ferrier y Guisan, 2006). La aplicación de modelos de distribución para especies en peligro de extinción es particularmente difícil debido a la distribución restringida de la especie. Sin embargo, hay modelos que son capaces de realizar, incluso con solamente 9 (Williams *et al.*, 2009) y 11 registros (Kumar y Stohlgren, 2009)

Los modelos estadísticos de regresión y los métodos basados en algoritmos específicos son dos de las grandes familias de técnicas de SDM (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011). MaxEnt es un programa de modelado basado en un algoritmo de máxima entropía que muestra las variables ambientales con base en restricciones que generan resultados robustos para la proyección espacial de la distribución de las especies (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011). Este programa es común y ampliamente aceptado y utilizado; Sin embargo, se requiere antecedentes biológicos y estadísticos con el fin de interpretar de forma adecuada la salida (Merow *et al.*, 2013). Otro método para el análisis a escala local se basa en el empleo de la técnica de los operadores de reclasificación y sobre posición temática integrados en un sistema de información geográfica (GIS); del mismo modo, este enfoque ha sido eficaz en la detección de hábitat de las especies actuales y potenciales (Williams *et al.*,

2009). El pinabete espinoso (*Picea chihuahuana* Martínez) es una especie endémica y en peligro de extinción, con un hábitat restringido, pequeñas poblaciones de esta especie se encuentran en la Sierra Madre Occidental, sólo en los estados de Chihuahua y Durango (Gordon, 1968; Ledig *et al.*, 2000; SEMARNAT, 2010; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014). El hábitat de *P. chihuahuana* se limita a pendientes de 35 a 80 %, elevaciones de 2150 a 2990 m, y exposiciones norte, noreste y noroeste. Las características del clima son: temperatura anual de 9-12 °C, la temperatura del mes más frío de 03.08 a 07.03 °C, la temperatura del mes más cálido de 13.9 a 17.6 °C, y el rango de precipitación media a partir de 600 a 1300 mm (Ledig *et al.*, 2000; Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Ledig *et al.* (2000) compararon las poblaciones de *P. chihuahuana* con los de Narváez (1984) concluyendo que los árboles jóvenes y árboles adultos se redujo en un período de 15 años; Sin embargo, la presencia de las plantas de árboles semilleros conduce a anticipar la regeneración. Estudios recientes indican que poblaciones pequeñas y aisladas de *P. chihuahuana* están en peligro de desaparecer debido a la baja diversidad y la erosión genética (Ledig *et al.*, 1997; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Wehenkel y Sáenz-Romero, 2012; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014). Además, estas poblaciones están restringidas debido a la fragmentación de los bosques y el cambio climático (Ledig *et al.*, 2010). Un estudio anterior (Sánchez-Córdova, 1984; Sánchez, 1996) enfatizó en la importancia del monitoreo de las poblaciones de *P. chihuahuana* con fuentes de datos de mayor resolución espacial. En este estudio se desarrollaron modelos de distribución con tres escalas (locales, estatales y nacionales) para

determinar el hábitat potencial donde *P. chihuahuana* se puede establecer para prevenir su extinción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

Este estudio utilizó 38 registros de poblaciones de *P. chihuahuana* de la Sierra Madre Occidental en México documentados por (Ledig *et al.*, 2000). Los datos climáticos de WorldClim y el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) se utilizaron a escalas nacional y estatal con una resolución de 0.943 × 0.943 km. El análisis local utilizó un registro histórico de datos de 40 años de 20 estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Chihuahua en una escala de 30 × 30 m (Medina-García *et al.*, 2006). Además, se emplearon los datos de uso de suelo y de vegetación obtenidos de estadísticas de una organización federal (INEGI, 2014).

Métodos de Modelación

Se utilizaron dos métodos para el modelado de la distribución geográfica de *P. chihuahuana*: MaxEnt, y los operadores de reclasificación y de sobre posición integrados en el SIG. MaxEnt es un programa que estima la probabilidad de ocurrencia de la especie basado en la distribución de máxima entropía, es decir, más cerca de uniforme (Loiselle *et al.*, 2008). Una condición para este programa, es que el valor esperado para cada variable ambiental de la distribución estimada coincida con su media empírica (Phillips *et al.*, 2006). También, se asume que la probabilidad de presencia estimada de una especie se asocia con las limitaciones impuestas por las variables ambientales (Elith *et al.*, 2011). Los parámetros fueron establecidos por defecto en MaxEnt: regularización = 1, máximo de puntos de base = 10.000, número máximo de iteraciones = 500, la convergencia de umbral predeterminado = 0.00001 y

prevalencia = 0.5.

El Cuadro 1 presenta las variables de entrada utilizadas para alimentar el programa MaxEnt. Se procesaron un total de 38 registros para la escala nacional, 23 para la estatal y 23 locales (Figura 1). A escala local, los resultados de MaxEnt se compararon con los generados por el método de reclasificación y sobre posición temática. Con base a lo reportado por estudios previos (Sánchez, 1996) una resolución de 90 m no proporcionan suficiente detalle para el análisis local. Por lo tanto, los datos de WorldClim no se utilizaron a escala local con MaxEnt debido a su baja resolución (0.943 × 0.943 km). En lugar se utilizaron datos climáticos con mayor resolución espacial (30 × 30 m) para generar el modelo (Medina-García *et al.*, 2006).

El método de reclasificación y sobre posición temática utiliza operadores booleanos que sobreponen varias capas de información o variables en SIG (Eastman, 2003). A escala local, las variables de pendiente y la exposición se obtuvieron a partir de un modelo digital de elevación (DEM) con una escala de 30 × 30 m. La temperatura media anual y precipitación de las estaciones meteorológicas locales, se correlacionaron con la elevación de los sitios donde se localizan estas estaciones. Los resultados del análisis de regresión se integraron al DEM. Con el fin de obtener la variable de la distancia a los flujos de agua, se utilizó el módulo de hidrología del programa ArcGIS 9.3v. Una vez que todas las capas fueron generadas y sobrepuestas, se generó el mapa con la distribución potencial de *P. chihuahuana*.

Evaluación de los Mapas de Distribución

La curva operacional ROC se utilizó para evaluar la bondad de ajuste del

Cuadro 1. Las variables de entrada para el modelo MaxEnt para *Picea chihuahuana* Martínez a escala nacional, estatal y local

VARIABLES	Nacional	Estatal	Local
Climáticas (WorldClim) ¹	X	X	
NDVI ^a	X	X	
Tipos de vegetación	X	X	X
Tipos de suelo	X	X	X
Pendiente			X
Altitud			X
Exposición			X
Distancia a los flujos de agua			X
Precipitación ²			X
Temperatura media anual ²			X

^a Índice de vegetación de diferencia normalizada, por sus siglas en ingles.

¹ 19 Variables climáticas.

² Datos históricos de 40 años de 20 estaciones meteorológicas de México.



Figura 1. Área de estudio para *Picea chihuahuana* Martínez en México.

modelo generado por MaxEnt para la estimación de la distribución de *P. chihuahuana*. El dominio y la independencia de las curvas ROC proporcionan una medida de precisión (Fielding, 2002) por lo que es una herramienta útil en las predicciones que implican los SDM's (Reineking, 2006). De acuerdo con Guisan *et al.* (2007) y Phillips *et al.* (2009) una puntuación de 1 indica una discriminación perfecta, una puntuación de 0.5 indica una relación mucho menor que la esperada al azar, y 0 indica que el modelo no tiene un poder predictivo (es decir, un rendimiento peor que al azar). Cuando el área bajo la curva (AUC) ROC es mayor que 0.9, se considera que el nivel de predicción del modelo tiene un rango de bueno a excelente (Wolmarans *et al.*, 2010). Además de las curvas ROC, se realizó un análisis Jackknife para determinar las variables que reducen la fiabilidad del modelo cuando se omiten.

Con el fin de evaluar los modelos, se procesaron 10 corridas al azar. Cada corrida fue creada por selección aleatoria de 75 % de los registros de ocurrencia como datos de entrenamiento y un 25 % como datos de prueba. Debido al hecho de que la salida de logística de MaxEnt genera valores continuos de probabilidad de ocurrencia, se establecieron rangos de probabilidad de presencia para *P. chihuahuana*. Al igual que en un estudio previo sobre una especie en peligro de extinción (Rovzar *et al.*, 2013), se definieron rangos de probabilidad con base en la distribución de *P. chihuahuana*. El intervalo de 0.7 a 1.0 como hábitat-prospero, donde la mayoría de los registros de ocurrencia de esta especie se localizaron, 0.5-0.7 como hábitat-adequado, donde se encuentra el resto de registros. El rango de 0 a 0.5 representada por un hábitat-pobre o baja probabilidad de presencia de *P. chihuahuana*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escala Nacional

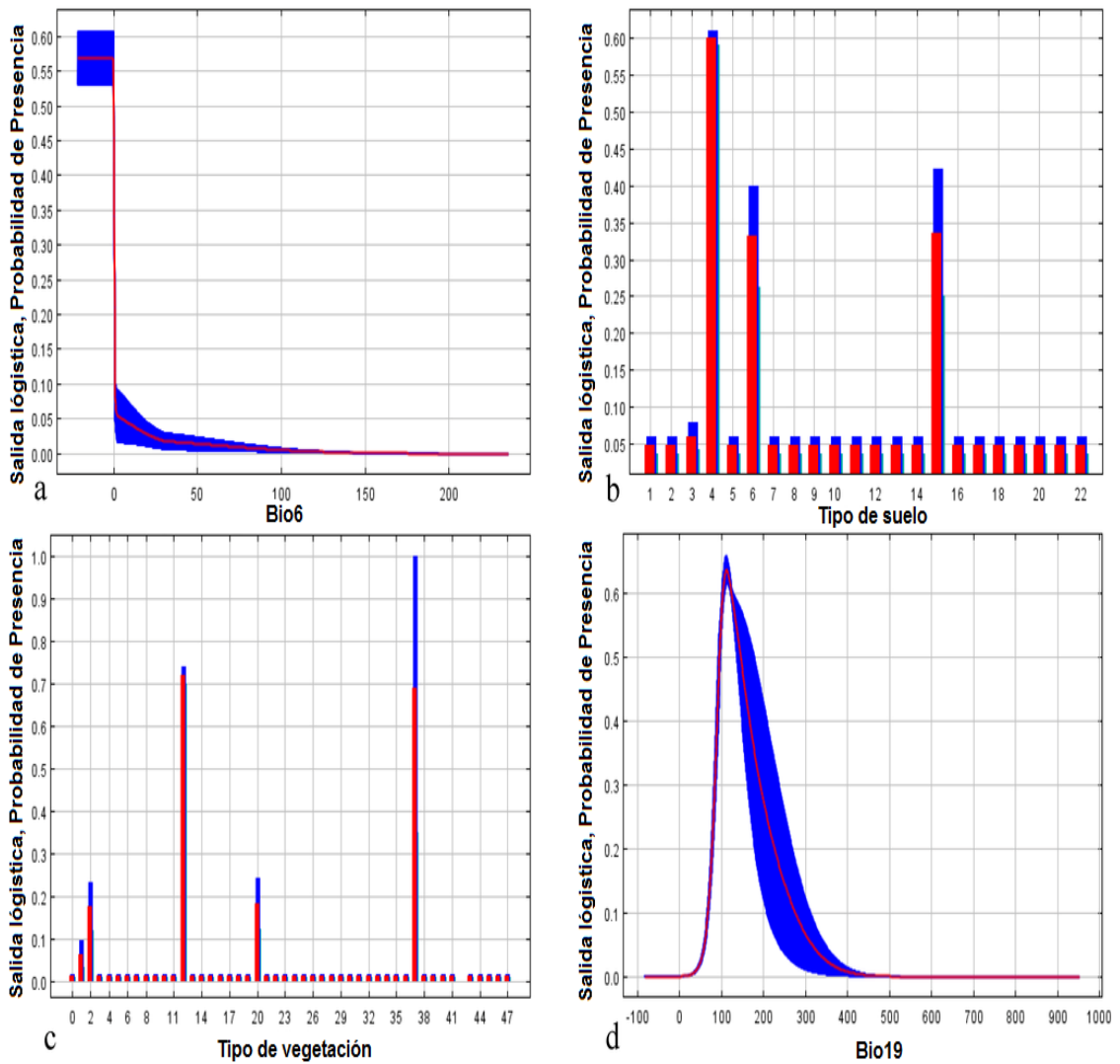
A esta escala el modelo presentó un alto ajuste con un valor de AUC = 0.991. En esta escala de paisaje, las variables del clima, la vegetación y tipos de suelo tuvieron un efecto significativo en la distribución de *P. chihuahuana*. De las variables del clima, la temperatura mínima del mes más frío presentó la contribución más alta (36.4 %) en la determinación de la probabilidad de ocurrencia de la especie (Cuadro 2). Del mismo modo, la precipitación del trimestre más frío contribuyó en 11.9 %. Entre las variables categóricas, la vegetación y los tipos de suelo también mostraron una contribución significativa para ajustar el modelo con valores de 19.8 y 14.7 %, respectivamente. Las variables con un menor porcentaje de contribución fueron la precipitación del mes más seco, la temperatura del trimestre más frío y la precipitación del trimestre más cálido.

La probabilidad máxima de ocurrencia de las variables más importantes para *P. chihuahuana* se muestran en la Gráfica 1. La temperatura mínima del mes más frío varió de -3 a 0 °C. Esta especie forma parte de los bosques de pino y prefiere suelos de tipo regosol éutrico. La probabilidad máxima para la precipitación de trimestre más frío es de alrededor de 100 mm.

La Figura 2 muestra como los valores más altos de ajuste se presentan en el bosque templado de la Sierra Madre Occidental (estados de Chihuahua y Durango). En el análisis de Jackknife (dejar-fuera-una, validación cruzada), el tipo de suelo fue la variable más importante; si se omite, se reduce el rendimiento del modelo (Gráfica 2).

Cuadro 2. Contribución de las variables de la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez en México a escala nacional

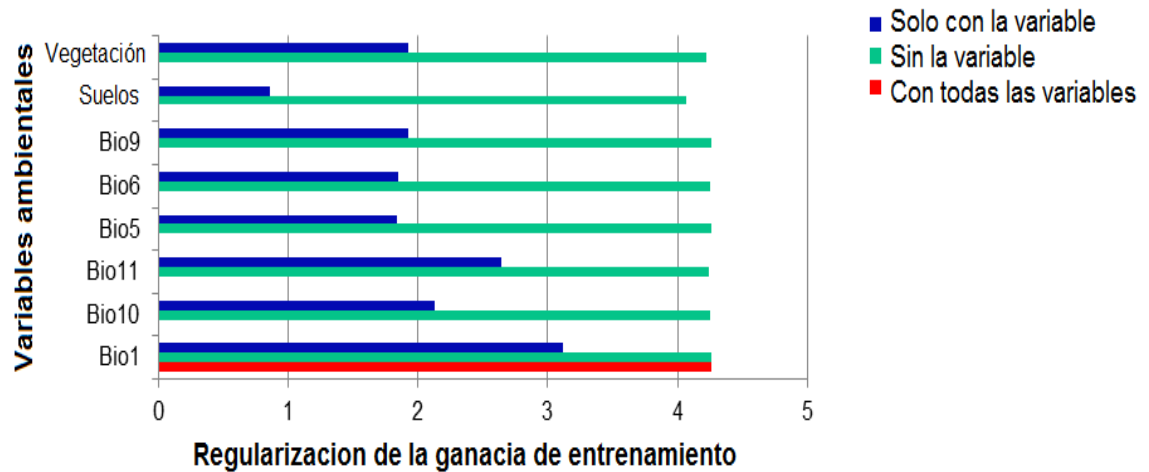
Variable	Contribución (%)	Importancia permutación
Temperatura mínima del mes más frío	36.4	0.9
Tipo de vegetación	19.8	0.1
Tipos de suelo	14.7	2.5
Precipitación del trimestre más frío	11.9	2.9
Precipitación del mes más seco	4.4	4.0
Temperatura media del trimestre más frío	3.9	35.1
La precipitación del trimestre más cálido	3.5	1.9
Temperatura media del trimestre más cálido	2.7	21.13
Temperatura media del trimestre más seco	0.9	0.0
Temperatura media anual	0.6	0.5
Precipitación del trimestre más seco	0.4	29.1



Gráfica 1. Curvas de respuesta de las variables que más contribuyeron en la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez en México (a= temperatura mínima del mes más frío (Bio6), b= tipos de suelo, c= tipos de vegetación, d= precipitación del mes más seco (Bio19)): modelo a escala nacional.



Figura 2. Mapa de la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez en México: Modelo a escala nacional.



Gráfica 2. Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para *Picea chihuahuana* Martínez en México a escala nacional. BIO1=Temperatura media anual, BIO5=Temperatura máxima del mes más cálido, Bio6=temperatura mínima del mes más frío, Bio9=Temperatura media del trimestre más seco, Bio10=Temperatura media del trimestre más cálido, y Bio11=Temperatura media del trimestre más frío.

Escala Estatal

El modelo mostró un AUC de 0.989, lo que sugiere su fiabilidad en la predicción de la distribución de *P. chihuahuana* a esta escala. Entre las variables del clima, la precipitación del mes más seco contribuyó con el 26.0 %, de la capacidad predictiva del modelo, mientras que la temperatura media anual representó el 18.3 % (Cuadro 3). Entre las variables categóricas, la vegetación y los tipos de suelo contribuyeron con el 19.3 y 16.3 %, respectivamente.

La probabilidad máxima de ocurrencia de *P. chihuahuana* con las variables de mayor importancia se muestran en las curvas de respuesta de la Gráfica 3. La precipitación del mes más seco es superior a 14 mm. Esta especie prefiere el tipo de suelo regosol éutrico y los bosques de pino como tipo de vegetación. Con respecto a la temperatura media anual, la probabilidad máxima se presentó a los 11 °C.

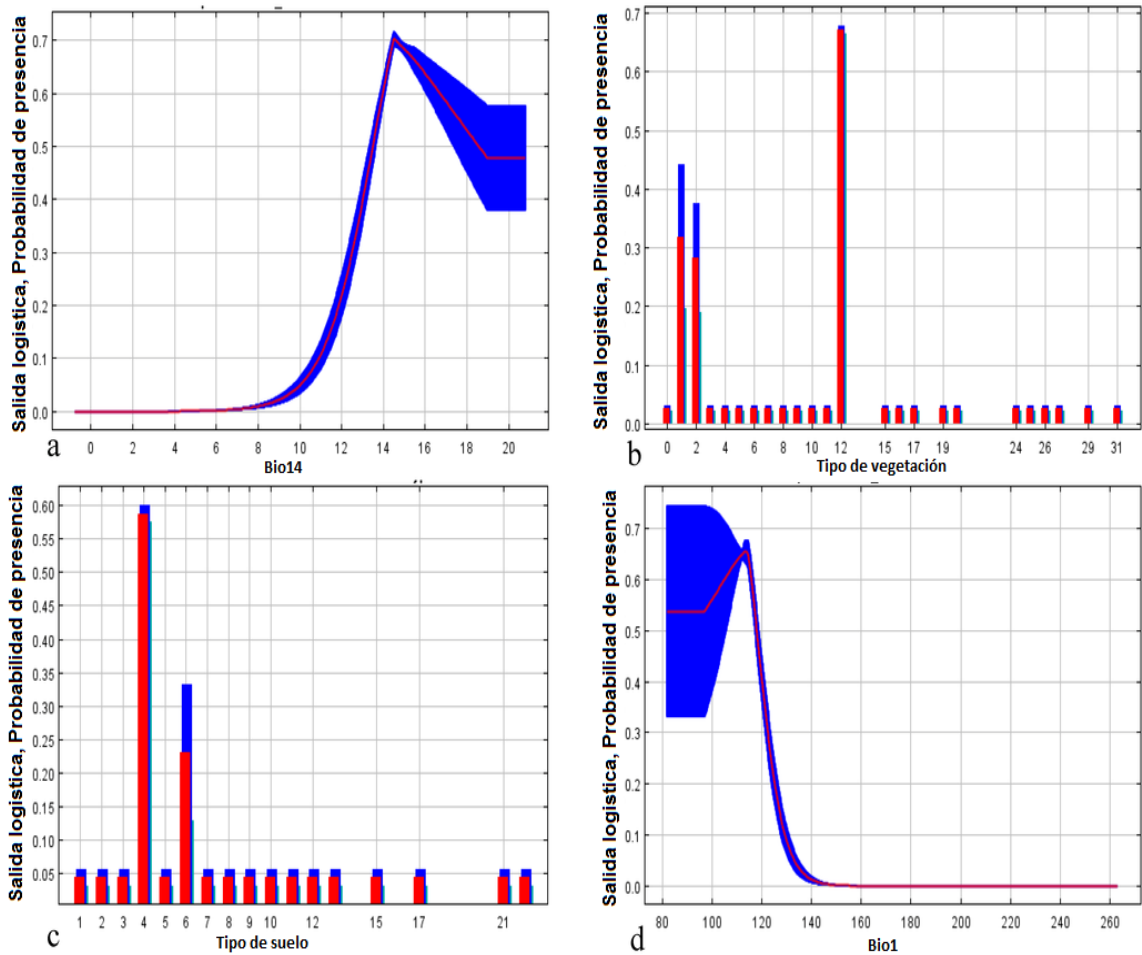
La Figura 3 muestra el mapa de la distribución potencial de *P. chihuahuana* para el estado de Chihuahua. Una alta probabilidad de ocurrencia de esta especie se encuentra al suroeste del estado. En el análisis de Jackknife, el tipo de suelo fue la variable de mayor importancia, ya que reduce significativamente la fiabilidad del modelo cuando esta variable se omite (Gráfica 4).

Escala Local

Los resultados del modelo MaxEnt se compararon con los del método de reclasificación y sobre posición en SIG. Ambos métodos mostraron patrones similares de distribución de la especie, con más de 90 % de similitud en la estimación de la zona potencial de *P. chihuahuana* (Cuadro 4).

Cuadro 3. Contribución de las variables de la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez a escala estatal en Chihuahua, México

Variable	Contribución (%)	Importancia permutación
La precipitación del mes más seco	26.00	0.09
Tipos de vegetación	19.30	1.00
Temperatura media anual	18.30	0,40
Tipos de suelo	16.30	3.40
La precipitación del trimestre más frío	5.00	13.30
Isotermalidad	4.30	0.10
Temperatura estacional	2.50	0.40
Rango de media diurna	1.90	18.90
La temperatura mínima del mes más frío	1.60	8.40
Temperatura media del trimestre más seco	1.20	27.90
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	0,90	1.00
Temperatura media del trimestre más frío	0.80	20.70
Precipitación del trimestre más cálido	0.60	0.02



Gráfica 3. Curvas de respuesta de las variables que más contribuyeron a la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez en México (a= temperatura mínima del mes más frío (Bio14), b= tipo de vegetación, c=tipo de suelo y d=precipitación del mes más seco (BIO1)): modelo a escala estatal.

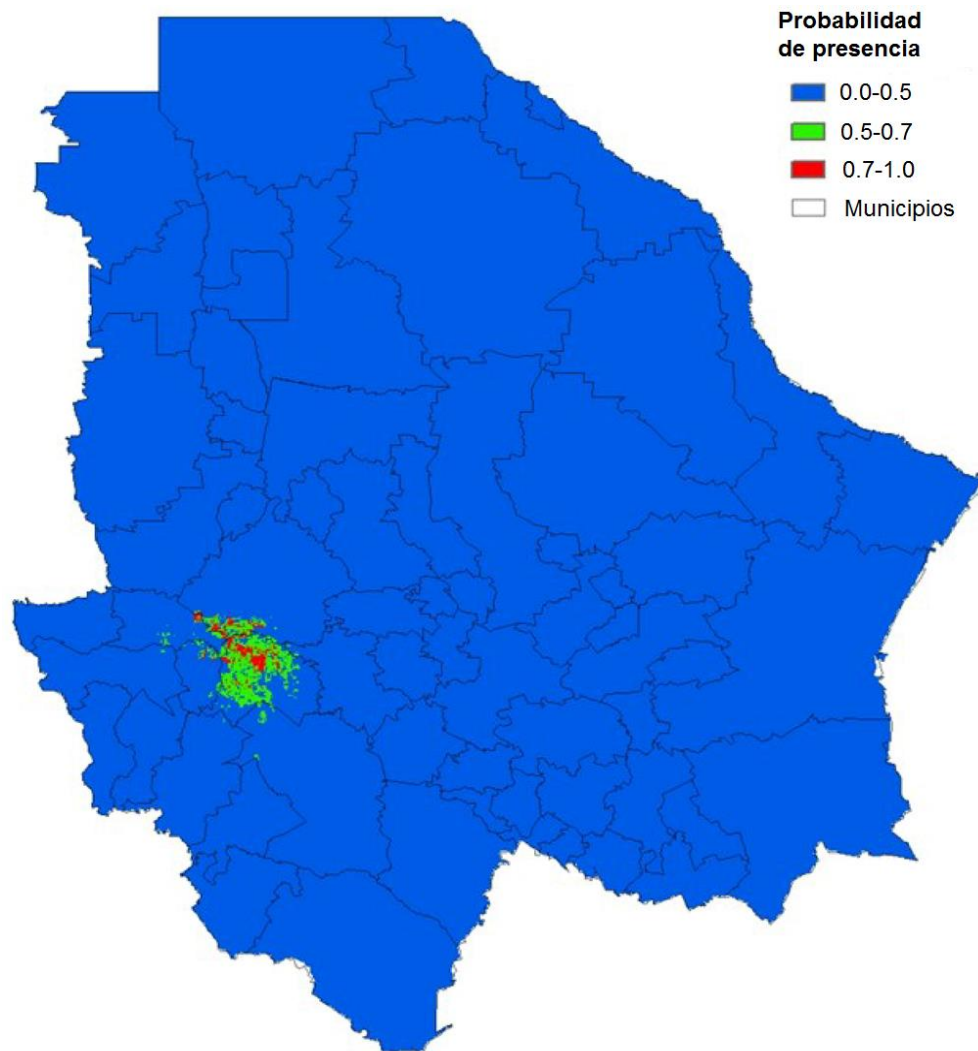
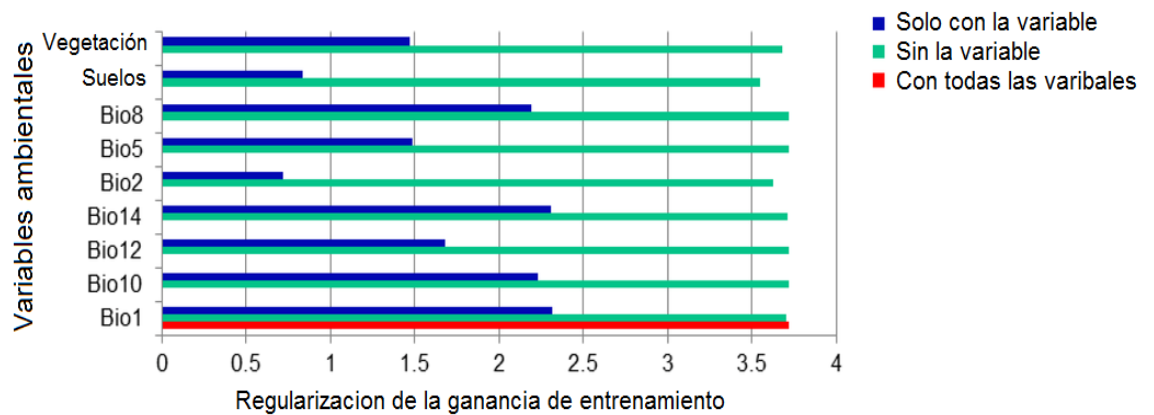


Figura 3. Mapa de la distribución potencial de la *Picea chihuahuana* Martínez en Chihuahua, México: modelo a escala estatal.



Gráfica 4. Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para *Picea chihuahuana* Martínez a escala estatal (Chihuahua, México). BIO1 = Temperatura media anual, Bio2= Rango de media diurna (media mensual (temperatura máxima-temperatura mínima)), BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido, Bio8=Temperatura media del trimestre más húmedo, Bio10 = Temperatura media del trimestre más cálido, Bio12 = Precipitación anual y Bio14 = Precipitación del mes más seco.

Cuadro 4. Áreas de la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez a escala local estimada por MaxEnt y el método de superposición

Distribución	MaxEnt		Método de sobre-posición	
	Superficie (km ²)	Zona (%)	Superficie (km ²)	Zona (%)
No potencial	51186	92.5	50934	97.0
Potencial	1.306	7.5	1.558	3.0

El Cuadro 5 presenta las variables que más contribuyeron al modelo MaxEnt, con una AUC de 0.978. La vegetación, la exposición y la distancia a los flujos de agua fueron las variables que más contribuyeron a explicar el modelo.

La probabilidad máxima de ocurrencia de las variables de mayor importancia para *P. chihuahuana* se muestran en las curvas de respuesta de la Gráfica 5. Al igual que las escalas nacional y estatal, esta especie prefiere el tipo de suelo regosol éutrico y bosque de pino. La exposición con más alta probabilidad de ocurrencia fue la norte. La distancia preferida a los flujos de agua varía de 0 a 200 m.

Los resultados de MaxEnt en el análisis local fueron igualmente robustos a los obtenidos con el método de reclasificación y la sobre posición temática. Esto sugiere la utilidad de MaxEnt para monitoreo y estudios de distribución de especies en peligro de extinción, especialmente los que crecen en áreas pequeñas caracterizadas por condiciones ambientales específicas (Figura 4). Sin embargo, en estas situaciones, MaxEnt se debe alimentar con datos climáticos de una resolución espacial adecuada.

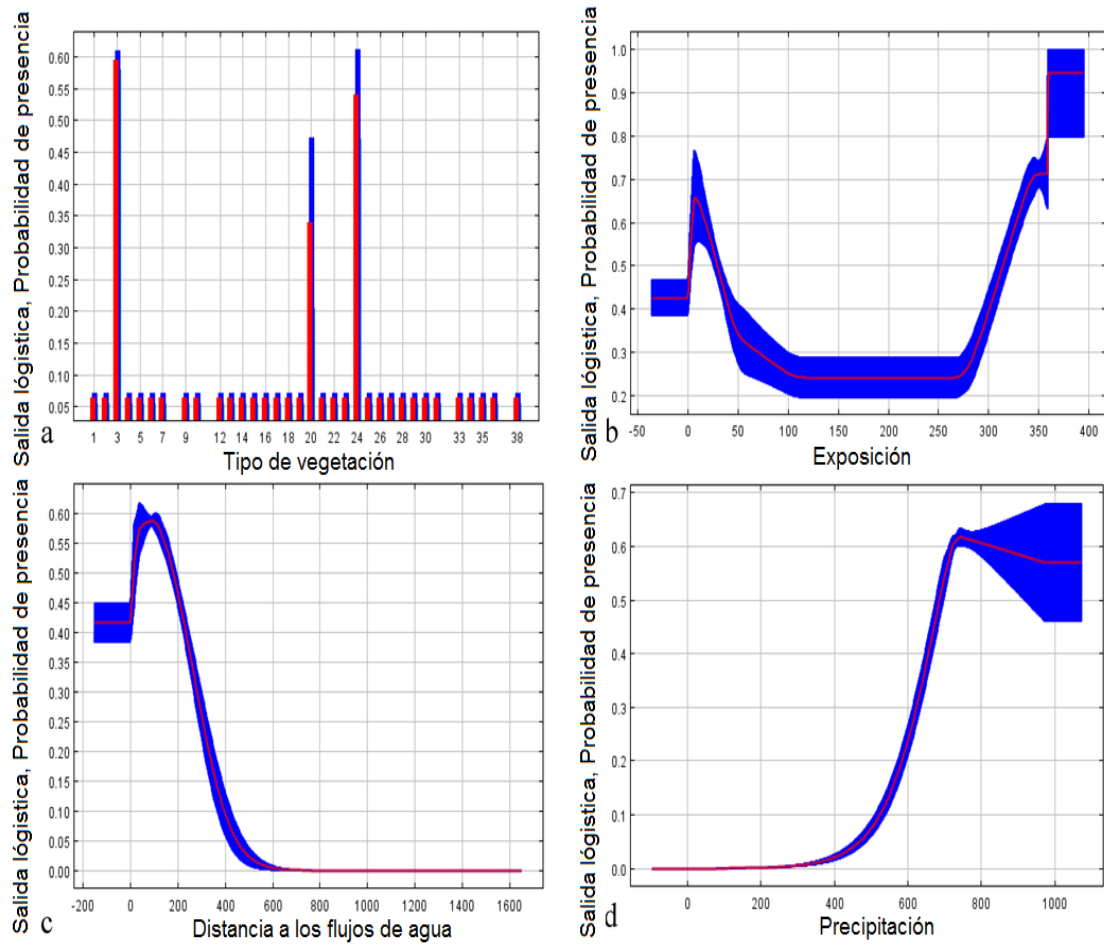
En el análisis de Jackknife (Gráfica 6), la distancia a los flujos de agua fue la variable que más redujo la capacidad predictiva del modelo cuando esta variable fue omitida bajo el proceso de validación cruzada.

Implicaciones

La ocupación territorial de las especies está limitada por la disponibilidad de hábitat adecuado, por barreras para su distribución y por procesos estocásticos (Wiser *et al.*, 1998). En este sentido, los modelos de distribución de especies sirven como herramientas importantes en el análisis de hábitat

Cuadro 5. Contribución de las variables a la distribución potencial de *Picea chihuahuana* Martínez: modelo a escala local

Variable	Contribución (%)	Importancia permutación
Tipos de vegetación	30.9	10.0
Exposición	21.2	6.6
Distancia a los flujos de agua	21.0	43.0
Precipitación	19.0	0.0
Pendiente	5.2	2.7
Temperatura media	1.7	36.8
Altitud	0.9	0.9



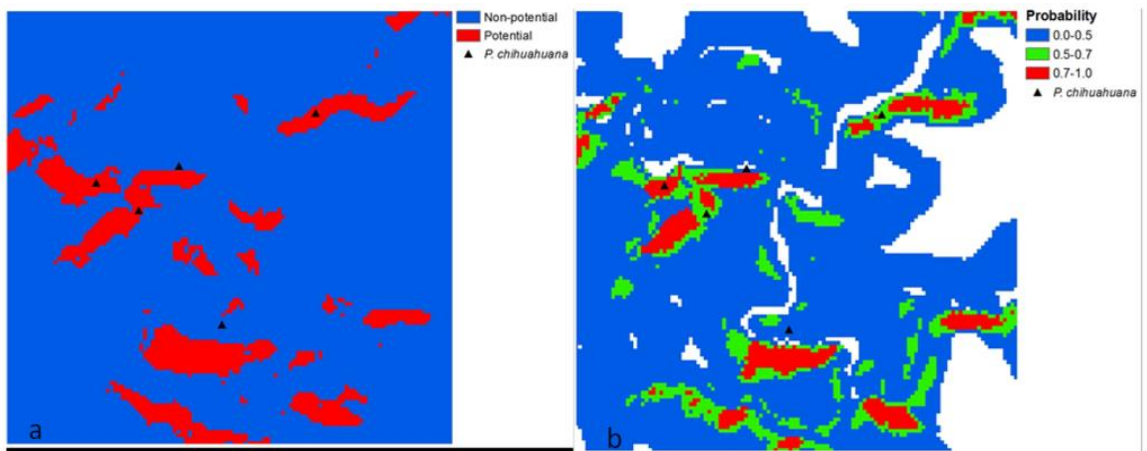
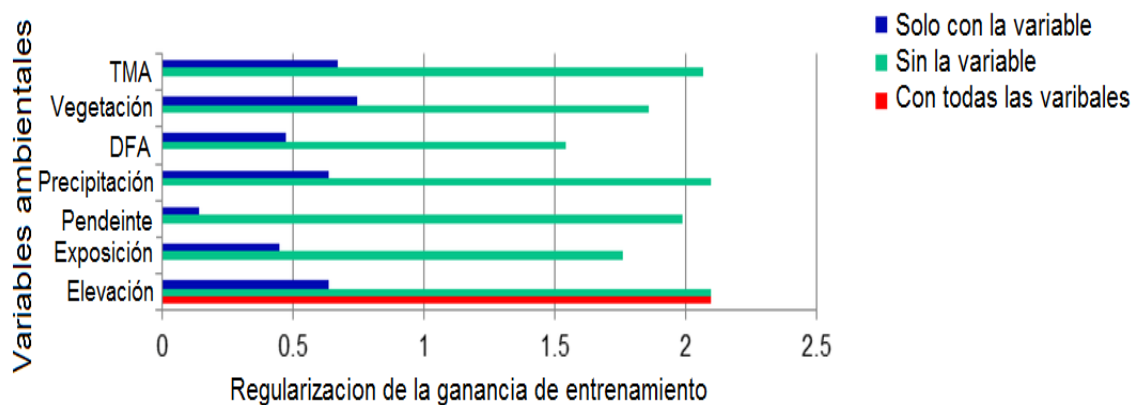


Figura 4. Mapas de áreas de distribución potencial de *Picea chihuahuana* a escala local mediante: (a) el método de superposición y (a) MaxEnt.



Gráfica 6. Jackknife de la regularización de ganancia estadística de entrenamiento para *Picea chihuahuana* Martínez a escala local. TMA = temperatura media anual y DFA = Distancia a los flujos de agua.

potencial de las especies, en particular en estudios con especies que presentan rangos de distribución estrecha y requerimientos de hábitat especiales (Williams *et al.*, 2009; Rupprecht *et al.*, 2011; Rovzar *et al.*, 2013) tales como *P. chihuahuana*. En este estudio, los modelos generados por MaxEnt a tres escalas (nacional, estatal y local) tuvieron un buen desempeño en la estimación de la distribución potencial de *P. chihuahuana*. Estos resultados lo corroboran los hallazgos de Pearson y Dawson (2003), demostrando que las variables climáticas de escala grande, por lo general tienden a desempeñar un papel más importante en el modelado. Por otro lado, las variables de alta resolución tales como exposición, la distancia a los flujos de agua y el tipo de vegetación tuvieron un alto poder predictivo (Cuadro 5). Además, al utilizar MaxEnt en las tres escalas, la vegetación mostró una contribución significativa, lo que refleja que la especie estudiada tiene un hábitat restringido. Aunque las variables climáticas fueron importantes por sí mismas a escalas nacional y estatal, el análisis de Jackknife mostró que el tipo de suelo juega un papel importante cuando se omitió de acuerdo a la validación cruzada. Estudios de características específicas de suelo son necesarios para explicar con mayor detalle la distribución de la *P. chihuahuana*.

El estudio a escala local proporcionó un análisis más detallado debido a la utilización de variables con una mayor resolución espacial. A esta escala, las variables más importantes fueron la vegetación, la exposición y la distancia a los flujos naturales de agua (Cuadro 4). Estas variables, además de la exposición y la pendiente, influyeron en las condiciones de hábitat restringido de esta especie, que se observa comúnmente en los cañones estrechos. Estos

lugares crean un ambiente con características específicas que son favorables para el crecimiento de esta especie. El hecho de que las especies en peligro de extinción, tales como *P. chihuahuana*, crezcan bajo condiciones ambientales específicas, se aumenta la capacidad de los modelos para identificar los hábitats apropiados (Messick y Hoagland, 2013). Con base en el área proyectada para el potencial de hábitat alto (0.7-1.0) de *P. chihuahuana* a través de MaxEnt y la distribución real estimada con la herramienta buffer (Nakazato *et al.*, 2010), se encontró que el área es 10 veces más grande que el área actual donde se distribuyó esta especie en los tres niveles analizados.

Aunque, MaxEnt es un programa ampliamente utilizado para las especies en peligro de extinción (Williams *et al.*, 2009; Rupprecht *et al.*, 2011; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014), las limitaciones de esta herramienta son señaladas por Williams *et al.* (2009). El hábitat estrecho debido a las condiciones ambientales específicas en las que se desarrollan las especies en peligro de extinción y el tamaño limitado de esas poblaciones, no proporcionan al modelo, suficiente variación para distinguir entre el hábitat potencial o el no potencial. Entre las soluciones, una vez que se desarrolla un SDM's, la validación de campo puede ser realizada mediante visitas de campo donde la especie podría estar presente. Sin embargo, en este caso, todas las poblaciones de *P. chihuahuana* ya han sido inventariados y no hay nuevas poblaciones detectadas y reportadas en los estudios de campo de los últimos años. Para superar estas limitaciones, el SDM para esta especie podría ser alimentado con variables eco-fisiológicas.

Las estrategias de conservación deben ser abordadas de diferentes maneras (a diferentes valoraciones), dependiendo del rango de distribución.

Nuestros resultados pueden ser utilizados para la planificación de corredores biológicos, resiembra y el trasplante en las poblaciones del sur, que son pequeñas, aisladas y con menor variabilidad genética (Jaramillo-Correa *et al.*, 2006; Ledig, 2012). Mientras tanto, la identificación del hábitat potencial puede ayudar a la conservación de *P. chihuahuana* protegiéndola de cualquier amenaza (*es decir*, la fragmentación, la tala) en las poblaciones del norte. Estas poblaciones presentan el más alto grado de variación genética y por lo tanto el mayor potencial de evolución adaptativa (Jaramillo-Correa *et al.*, 2006; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014; Quiñones-Pérez *et al.*, 2015).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Nuestros resultados identifican nuevas áreas para la distribución potencial de *P. chihuahuana* y presentan un rendimiento confiable de las metodologías basadas en SDM para esta especie. La disponibilidad de hábitat para la recuperación de las poblaciones de *P. chihuahuana* en México se demostró en tres escalas. El potencial alto de hábitat adecuado para *P. chihuahuana* es 10 veces más grande que el área actual en los tres niveles analizados. La información resultante se puede utilizar para apoyar los programas de manejo, conservación y restauración de esta especie, que está incluida en la categoría en peligro de extinción en la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT, 2010).

Estos datos podrían utilizarse para apoyar las estrategias de conservación en términos de: (i) el establecimiento de la regeneración artificial con el uso de materiales reproductivos locales obtenidos de sitios bien seleccionados, fuera de los límites de la población prioritaria (pero no desde el interior de toda la población), (ii) el aumento del tamaño de las poblaciones más pequeñas mediante la plantación de los individuos en las poblaciones al borde de la extinción, y (iii) conservación *ex situ* junto con la migración asistida en respuesta al cambio climático (Ledig, 2012).

LITERATURA CITADA

- Eastman, J. R. 2003. IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing. Clark Labs, Clark University Worcester. Massachusetts, USA.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee y C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17:43-57.
- Ferrier, S. y A. Guisan. 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *J. Appl. Ecol.* 43:393-404.
- Fielding, A. H. 2002. What are the appropriate characteristics of an accuracy measure. En *Predicting species occurrences: issues of accuracy and scale.* Scott, J., P. J. Morrison y L. Michael, Eds. Island Press, . Washington, USA.
- Funk, V. A. y K. S. Richardson. 2002. Systematic data in biodiversity studies: use it or lose it. *Systematic biology.* 51:303-316.
- Gordon, A. G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. *Ecology.* 49:880-896.
- Guisan, A., C. H. Graham, J. Elith y F. Huettmann. 2007. Sensitivity of predictive species distribution models to change in grain size. *Divers. Distrib.* 13:332-340.
- INEGI. 2014. Insitituto Nacional de Estastica, Geografia e Informática: Uso de Suelo y Vegetación. En: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/Default.aspx> Consultado 2 de Julio 2014
- Jaramillo-Correa, J. P., J. Beaulieu, F. T. Ledig y J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. *Mol. Ecol.* 15:2787-2800.
- Kumar, S. y T. J. Stohlgren. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ.* 1:094-098.
- Ledig, F. T. 2012. Climate change and conservation. 8:57-74.
- Ledig, F. T., V. Jacob-Cervantes, P. D. Hodgskiss y T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. 51:1815-1827.

- Ledig, F. T., M. Mápula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López y M. A. Capó-Arteaga. 2000. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. 71-88.
- Ledig, F. T., G. E. Rehfeldt, C. Saenz-Romero y C. Flores-Lopez. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American journal of botany*. 97:970-987.
- Loiselle, B. A., P. M. Jørgensen, T. Consiglio, I. Jiménez, J. G. Blake, L. G. Lohmann y O. M. Montiel. 2008. Predicting species distributions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes? *J. Biogeogr.* 35:105-116.
- Medina-García, G., G. Díaz-Padilla, M. Berzoza-Martínez, M. M. Silva-Serna, A. H. Chávez-Silva y A. D. Báez-González. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Chihuahua (1961-2003).
- Merow, C., M. J. Smith y J. A. Silander. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*. 36:1058-1069.
- Messick, J. y B. Hoagland. 2013. Potential distribution modeling of *Penstemon oklahomensis* (Plantaginaceae). *J. Bot. Res. Inst. Texas*. 7.
- Nakazato, T., D. L. Warren y L. C. Moyle. 2010. Ecological and geographic modes of species divergence in wild tomatoes. *Am. J. Bot.* 97:680-693.
- Narváez, F. 1984. Contribución al Conocimiento de la Ecología de *Picea chihuahuana*.
- Pearson, R. G. y T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecol. Biogeogr.* . 12:361-371.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson y R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* 190:231-259.
- Phillips, S. J., M. Dudík, J. Elith, C. H. Graham, A. Lehmann, J. Leathwick y S. Ferrier. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: implications for background and pseudo-absence data. *Ecol. Appl.* 19:181-197.
- Pliscoff, P. y T. Fuentes-Castillo. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de geografía Norte Grande*. 48: 61-79.

- Quiñones-Pérez, C., S. Simental-Rodríguez, C. Saenz-Romero, J. Jaramillo-Correa y C. Wehenkel. 2014. Spatial genetic structure in the very rare and species-rich *Picea chihuahuana* tree community (Mexico). *Silvae Genet.* 63:149-159.
- Quiñones-Pérez, C. Z., C. Sáenz-Romero y C. Wehenkel. 2015. Genetic diversity and conservation of *Picea chihuahuana* Martínez: A review. *Afr. J. Biotechnol.* 13.
- Reineking, B. 2006. Constrain to perform: regularization of habitat models. *Ecol. Model.* 193:675-690.
- Rovzar, C., T. W. Gillespie, K. Kawelo, M. McCain, E. C. Riordan y S. Pau. 2013. Modelling the potential distribution of endangered, endemic *Hibiscus brackenridgei* on Oahu to assess the impacts of climate change and prioritize conservation efforts. *Pac. Conserv. Biol.* 19:156-168.
- Rupprecht, F., J. Oldeland y M. Finckh. 2011. Modelling potential distribution of the threatened tree species *Juniperus oxycedrus*: how to evaluate the predictions of different modelling approaches? *J. Veg. Sci.* 22:647-659.
- Rushton, S. P., S. J. Ormerod y G. Kerby. 2004. New paradigms for modelling species distributions? *J. Appl. Ecol.* 41:193-200.
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Clim. Chang.* 102:595-623.
- Sánchez-Córdova, J. 1984. *Picea chihuahuana*, una Conífera en Peligro de Extinción. *Rev. Ciencia Forestal.* 9:51-63.
- Sánchez, M. 1996. Detección de áreas potenciales para la propagación del pinabete espinoso (*Picea chihuahuana* Martínez).
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Wehenkel, C. y C. Sáenz-Romero. 2012. Estimating genetic erosion using the example of *Picea chihuahuana* Martínez. *Tree Genet. Genomes.* 8:1085-1094.
- Williams, J. N., C. Seo, J. Thorne, J. K. Nelson, S. Erwin, J. M. O'Brien y M. W. Schwartz. 2009. Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Divers. Distrib.* 15:565-576.
- Wiser, S. K., R. K. Peet y P. S. White. 1998. Prediction of rare-plant occurrence: a southern Appalachian example. *Ecol. Appl.* 8:909-920.

Wolmarans, R., M. P. Robertson y B. J. van Rensburg. 2010. Predicting invasive alien plant distributions: how geographical bias in occurrence records influences model performance. *J. Biogeogr.* 37:1797-1810.

**ESTUDIO II. POBLACIONES DE *Picea chihuahuana* BAJO DIFERENTES
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

RESUMEN

POBLACIONES DE *Picea chihuahuana* BAJO DIFERENTES ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

POR:

M. C. VICTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Las condiciones ambientales pasadas de una especie permiten conocer la dinámica de su distribución; además, permiten analizar bajo diferentes escenarios su proyección hacia el futuro. El objetivo fue analizar la influencia de las variables climáticas de la distribución de *Picea chihuahuana* actuales, bajo diferentes escenarios paleoclimáticos y futuros. Se utilizaron 38 registros de *P. chihuahuana* y las variables climáticas de WordClim. Se aplicaron análisis de componentes principales, clúster y discriminante para determinar diferencias y similitudes de condiciones climáticas para *P. chihuahuana*. Además, se proyectaron hacia el pasado (Ultima Máxima Glaciación=UMG y Holoceno Medio=HM, con los modelos CCSM4 y MIROC-ES), presente (1950 a 2000) y futuro (2050 y 2070; CCSM4 y HadGEM2-ES con cuatro niveles de forzamiento cada uno). El análisis multivariado detectó diferencias climáticas entre las poblaciones de *P. chihuahuana* agrupados en tres clúster. Estos clúster corresponden a las tres regiones existentes de las poblaciones de *P. chihuahuana*: norte, centro y sur sobre la Sierra Madre Occidental. Las proyecciones mostraron que: la distribución de *P. chihuahuana* fue amplia en el periodo de la UMG, a partir del HM es similar al actual y para el futuro se reduce considerablemente. Los modelos indicaron que para los años 2050 y 2070 bajo el escenario CPR8.5 la distribución de esta especie desaparecerá.

ABSTRACT

POPULATIONS OF *Picea chihuahuana* UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE

BY:

VICTOR MANUEL AGUILAR SOTO

Past environmental conditions of a species provide insight into the dynamics of their distribution; also possible to analyze different scenarios under its projection into the future. The aim was to analyze the influence of climatic variables of the current distribution of *Picea chihuahuana* and under different paleoclimatic and future scenarios. 38 records of *P. chihuahuana* and climatic variables WordClim were used. Principal component analysis, cluster and discriminant applied to determine differences and similarities of climatic conditions for *P. chihuahuana*. In addition, projected into the past (Maximum Last Glaciation = UMG and Middle Holocene = HM, with CCSM4 and MIROC-ES models), to present (1950-2000) and future (2050 and 2070; CCSM4 and HadGEM2-ES with four scenarios each). Multivariate analysis detected climatic differences between populations of *P. chihuahuana* grouped into three clusters. In addition, projected into the past (Maximum Last Glaciation = UMG and Middle Holocene = HM, with CCSM4 and MIROC-ES models), to present (1950-2000) and future (2050 and 2070; CCSM4 and HadGEM2-ES with four scenarios each). Multivariate analysis detected climatic differences between populations of *P. chihuahuana* grouped into three clusters. Projections showed that the distribution of *P. chihuahuana* was extensive during the period of UMG for the HM and was similar to the present and the future was considerably reduced

according to the CCSM4 and HadGEM2-ES models. But the disappearance occurred in the CPR8.5 scenario for the years 2050 and 2070. The populations of *P. Chihuahua* they are locate in the SMO and share similar environmental conditions of temperate forest, with slight differences between areas in relation to weather conditions. The model projection into the past may have had a wide distribution, with a reduction in the immediate period, similar to the current and possibly their populations will be affected greatly for the years 2050 and 2070.

INTRODUCCIÓN

El pinabete espinoso (*Picea chihuahuana*) es un relicto-endémico de México que sobrevivió desde la última máxima glaciación. Evidencias polinialógicas del antiguo lecho del lago de Texcoco, ahora ciudad de México, y del lago de Chalco señalan que *P. chihuahuana* fue abundante en las partes altas a finales del Pleistoceno aproximadamente 12,500 a 9000 años AP (Sears y Clisby, 1955). Su persistencia se registró hasta hace unos 7000 a 8000 años (Lozano-García *et al.*, 1993). La declinación se basa en especulaciones sobre incrementos en la temperatura del holoceno (7000 a 8000 años) que superó la capacidad de adaptación de esta especie por el corto período de tiempo en que sucedió (Ledig *et al.*, 1997). Como respuesta de adaptación, esta especie migró hacia el noroeste de México sobre la cadena montañosa de la Sierra Madre Occidental de climas templados fungiendo como refugios al presentar hábitat protegidos (Lozano-García *et al.*, 1993; Rzedowski, 2006).

Actualmente, las poblaciones de esta especie se localizan a 700 km aproximadamente de la ciudad de México al noroeste en la Sierra Madre Occidental y unos 500 km al norte de la ciudad de México para otras especies del mismo género en la Sierra Madre Oriental (Patterson, 1988). Su distribución actual se limita solo a los estados de Chihuahua y Durango con 39 poblaciones de alrededor de 40,000 individuos (Ledig *et al.*, 2000; Aguilar-Soto *et al.*, 2015). El pinabete espinoso ha sido aprovechado principalmente como árbol de navidad y extracción de celulosa; sin embargo, ecológicamente ofrece gran variedad de beneficios dentro de su ecosistema (Gordon, 1968; Narváez, 1984; Jaramillo-Correa *et al.*, 2006). Desgraciadamente, presenta diversos problemas

tales como: poblaciones geográficamente aisladas, reproducción irregular debido a la distribución heterogénea de edades en la población, escasa regeneración natural y la tala ilegal para aprovechar su madera y celulosa (Gordon, 1968; Mata, 2000). La situación de esta especie aunada a la presión antropogénica la ha posicionado en el catálogo de especies en riesgo con el estatus de especie peligro de extinción (SEMARNAT, 2010). En general para México, los bosques fríos y cálidos templados donde habitan coníferas y latifoliadas son los más vulnerables a los incrementos de temperatura (Villers *et al.*, 2004; Keenan, 2012); especialmente las especies con poblaciones naturales restringidas. Las poblaciones pequeñas y con periodos generacionales largos presentan mayor riesgo (Walther *et al.*, 2002). Tal es el caso de *P. chihuahuana* que prefiere una temperatura media anual de 12.9 °C, la temperatura del mes más frío de 3.8 a 7.3 °C, temperatura del mes más cálido de 13.9 a 17.6 °C y el rango de precipitación 600-1300 mm. Estas condiciones se localizan específicamente en cañones con pendientes de 35 a 80 %, elevaciones de 2,150 a 2,990 m y con orientaciones que van de NE a NW (Ledig *et al.*, 2000; Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014). Las condiciones de desarrollo son exclusivas de especies de áreas remanentes sombrías de la Sierra Madre Occidental vulnerable a las variaciones climáticas. Se pronostican próximos cambios del clima con bruscas variaciones de temperatura (IPCC, 2013). Esto representa una de las mayores amenazas para *P. chihuahuana*, ya que es considerada susceptible a la desaparición.

La modelación mediante proyecciones de escenarios ya sea hacia el pasado o hacia el futuro de las condiciones climáticas permite analizar la

tendencia de su distribución. En los últimos años se han aplicado un gran número de modelos para predecir los efectos del cambio climático sobre especies vegetales y ecosistemas (Guisan y Thuiller, 2005; Rehfeldt *et al.*, 2006; Iverson *et al.*, 2008; Keenan, 2012). Sin embargo, para especies en peligro de extinción como *P. chihuahuana* aún son escasas y son necesarias para anticipar estrategias de conservación. Algunas publicaciones sobre *Picea* son: Ledig *et al.* (1997) que describieron la respuesta de *Picea* ante variaciones climáticas del Holoceno. Años después Ledig *et al.* (2000) reportaron la localización de poblaciones conocidas de esta especie en el norte de México. También se evaluaron ocho especies de *Picea* ante la respuesta a diferentes factores ambientales y geográficos (Miyazawa y Lechowicz, 2004).

El objetivo fue analizar la influencia de las variables climáticas en la distribución de *P. chihuahuana* bajo tres proyecciones de escenarios. Las condiciones ambientales de una especie proyectada hacia el pasado dan idea del comportamiento de la tendencia de su distribución y las proyecciones hacia el futuro permiten analizar los posibles riesgos que la especie experimentaría.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

México cubre un gradiente latitudinal desde los 14° 30' N hasta los 32° 42' N lo cual comprende una compleja topografía y condiciones climáticas que originan una gran diversidad de ecosistemas (Rzedowski, 2006). Las características fisiográficas y climáticas que inciden en los bosques templados en donde se localizan las poblaciones de *Picea chihuahuana* están ampliamente documentados por González-Elizondo *et al.* (2012) y García (2004). Debido a esta variabilidad topo climática, la historia geológica del país es compleja, con características evolutivas que remarcan las razones de los estudios de paleoclima y fitodiversidad. Las zonas de distribución histórica de *Picea chihuahuana* son documentadas por Sears y Clisby (1955) y Lozano-García *et al.* (1993); las actuales por Ledig *et al.* (2000) y Aguilar-Soto *et al.* (2015).

Hábitat de *Picea chihuahuana*

Las condiciones que favorecen el desarrollo de *P. chihuahuana* y sus asociaciones vegetales (con diferentes géneros: *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Abies*, *Juniperus*, *etc.*) son documentadas por García-Arévalo (2008). Generalmente, esta especie se presenta en cañadas húmedas orientadas hacia el norte del relieve de la Sierra Madre Occidental (Ledig *et al.*, 2000). El clima dominante es del tipo semifrío húmedo con lluvias en verano (C) E (W₂) y el clima semifrío (C) E (García, 2004; Quiñones-Pérez *et al.*, 2014). Las precipitaciones varían de 500 a 1200 mm anuales y el rango de temperatura media anual es de 5 a 12 °C (INEGI, 2009). Las poblaciones de *P. chihuahuana* se restringen a pendientes

de 35 a 80 %, elevaciones de 2150 a 2200 msnm y orientación del relieve hacia el N, NE y NW (Quiñones-Pérez *et al.*, 2014).

Fuente y Registro de Datos

En el desarrollo de este estudio se utilizaron 38 registros de poblaciones de *P. chihuahuana* localizadas en la Sierra Madre Occidental en México y documentados por Ledig *et al.* (2000). Para el análisis de diferenciación climática entre las poblaciones de *P. chihuahuana* se utilizaron las 19 variables climáticas de la página de WordClim (<http://www.worldclim.org/download>) y 14 variables para las proyecciones del paleoclima. Previo al análisis, las variables climáticas fueron organizadas en una base de datos para realizar las corridas conforme a los requerimientos del software del modelo utilizado. Las ocurrencias de la especie fueron registradas en formato CSV de Excel delimitado por comas. Para su proyección al sistema de coordenadas geográficas bajo el datum WGS1984, las variables climáticas fueron registradas en el formato ASCII.

Diferencias y Similitudes entre Poblaciones

Para conocer la influencia del clima en la distribución de las poblaciones, su agrupamiento e identificar las variables determinantes en esta agrupación, fue necesario apoyarse en herramientas estadísticas multivariadas.

Análisis de componentes principales (ACP). Este análisis implicó una síntesis o reducción de la dimensionalidad de información multivariada; esto a través de nuevos componentes o factores que resultan de las combinaciones lineales de las variables originales (Johnson, 2000). Con la herramienta de PRINCOMP de SAS, se procedió a identificar las diferencias y similitudes entre

las poblaciones de *P. chihuahuana* de acuerdo a las condiciones climáticas. Estas diferencias y semejanzas se valoraron a través de los nuevos componentes obtenidos. En esta forma, se analizaron las correlaciones de las variables originales con los nuevos componentes para la determinación de la influencia de las variables ambientales.

Análisis clúster. Una vez identificadas las diferencias y similitudes entre poblaciones, se procedió integrar en grupos, las poblaciones que presentaron mayores similitudes y separar aquellas diferentes o distantes en otro grupo a través del método de distancias de Mahalanobis (Peña, 2002). El análisis se realizó con el procedimiento CLUSTER de SAS.

Análisis discriminante. Finalmente, mediante este análisis se detectaron las variables que mejor separaron las poblaciones en relación a las condiciones climáticas y se estimó las probabilidades de ubicación de cada población en grupos predefinidos. El análisis del poder discriminante por pasos (STEPWISE utilizando el procedimiento STEPDISC de SAS) fue ejecutado con restricciones de significancia de 0.15 tanto para las variables introducidas como las que permanecieron en el modelo. De esta manera, se seleccionaron las variables que mejor discriminaron los grupos de poblaciones. Este proceso se realizó con DISCRIM de SAS que permitió confirmar la separación de los grupos de poblaciones y así obtener las diferencias entre grupos mediante el análisis de varianza multivariada (MANOVA).

Selección de Variables Climáticas

Este proceso se realizó con el propósito de eliminar las variables climáticas con información similar. Se utilizó un análisis de correlación con el

procedimiento CORR de SAS para detectar correlaciones altas (>89 %) entre las variables climáticas dentro de las poblaciones de *P. chihuahuana* (Cuadro 6). Las variables Bio4, Bio10, Bio11, Bio13 y Bio17 presentaron colinearidad con una o dos variables. Su eliminación redujo la correlación con el resto de las variables, de esta forma se seleccionaron 14 variables (Cuadro 7). Aunque la correlación entre Bio12 y Bio16 fue alta ($r=0.96$), se decidió no eliminar estas variables, debido a su importancia para analizar el hábitat de la especie.

Modelos de Distribución de Especies

Los modelos de distribución de especies se construyeron con MaxEnt. MaxEnt es un programa que estima la probabilidad de ocurrencia de las especies basándose en la distribución de la máxima entropía, es decir, más cercana al uniforme (Loiselle *et al.*, 2008, Phillips *et al.*, 2006). Estos modelos se establecieron como línea base para realizar las proyecciones al presente (actual), pasado y a futuro.

Modelo de Distribución Actual. Una vez seleccionadas las variables climáticas, se generaron los modelos de distribución potencial actual bajo dos tipos de resolución espacial (2.5 minutos y 30 segundos). Este algoritmo fue ejecutado con los parámetros establecidos por el software mediante la técnica de la validación cruzada (n-1); esta técnica es útil para especies amenazadas o en peligro de extinción que cuentan con pocos registros de ocurrencia (Pearson *et al.*, 2007). El formato de salida de los mapas proyectados fue dado en valores de probabilidad de tipo logístico. Estos valores fueron reclasificados en tres clases, definido por dos umbrales de corte. El primer corte del umbral considero el 10 percentil determinado por MaxEnt para las presencias de *P. chihuahuana*

Cuadro 6. Correlaciones lineal de las variables climáticas para las poblaciones de *Picea chihuahuana*

	bio1	bio2	bio3	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9	bio12	bio14	bio15	bio16	bio18	bio19
bio1	1													
bio2	-0.57	1												
bio3	0.12	-0.12	1											
bio5	0.69	0.04	-0.41	1										
bio6	-0.45	0.37	-0.26	-0.10	1									
bio7	-0.47	0.78	-0.70	0.30	0.45	1								
bio8	0.78	-0.29	-0.27	0.78	-0.16	-0.02	1							
bio9	0.86	-0.43	0.29	0.58	-0.38	-0.48	0.58	1						
bio12	0.38	-0.61	0.47	-0.16	-0.17	-0.71	0.10	0.39	1					
bio14	0.32	-0.59	0.14	-0.06	-0.10	-0.50	0.16	0.26	0.77	1				
bio15	-0.10	0.35	0.20	-0.03	0.15	0.12	0.00	0.01	-0.08	-0.51	1			
bio16	0.34	-0.52	0.51	-0.18	-0.14	-0.68	0.07	0.38	0.96	0.59	0.16	1		
bio18	0.22	-0.41	0.35	-0.20	-0.05	-0.51	0.11	0.23	0.77	0.51	0.19	0.82	1	
bio19	0.25	-0.50	0.10	-0.04	-0.08	-0.42	0.08	0.34	0.73	0.85	-0.40	0.58	0.51	1

Cuadro 7. Variables climáticas seleccionadas a partir del análisis de correlaciones

Clave	VARIABLES	UNIDADES
Bio1	Temperatura media anual	°C
Bio2	Rango media diurna	°C
Bio3	Rango de temperatura anual	-
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	°C
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío	°C
Bio7	Rango de temperatura anual	°C
Bio8	Temperatura media del cuarto más húmedo	°C
Bio9	Temperatura media del cuarto más seco	°C
Bio12	Precipitación anual	mm
Bio14	Precipitación del mes más seco	mm
Bio15	Precipitación estacional	
Bio16	Precipitación del cuarto más húmedo	mm
Bio18	Precipitación del trimestre más Cálido	mm
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	mm

y el segundo con base a la igualdad entre los errores de sensibilidad y especificidad, aumentando cuatro veces la probabilidad de presencia. Este último aspecto es recomendable para presencias y pseudo-ausencias desproporcionales (Brito *et al.*, 1999). Las clases establecidas fueron con la finalidad de detectar áreas con mayores probabilidades de ocurrencia de la especie y para la comparación de los modelos entre los diferentes periodos y entre escenarios.

La resolución de 2.5 minutos por su tamaño de pixel, sólo utilizó 28 registros, puesto que algunos de ellos se localizaron dentro de un mismo pixel. En cambio, bajo la resolución de 30 segundos se utilizaron los 38 registros. Se aplicaron 27 y 37 repeticiones, de tal manera que la validación cruzada consideró todas las observaciones menos uno (n-1) en cada iteración.

Proyecciones Paleoclimáticas de *Picea chihuahuana*. Los periodos en relación al pasado correspondieron a la Última Máxima Glaciación (UMG) y Holoceno Medio (HM) con los modelos CCSM4 y MIROC-ES. Las proyecciones a futuro se establecieron a los años 2050 y 2070 bajo los modelos CCSM4 y HadGEM2-ES con sus cuatro escenarios de niveles de forzamiento radiativo: CPR2.6, CPR4.5, CPR6.0, y CPR8.5 establecidos en el Quinto informe del IPCC (2013). La resolución de los escenarios anteriores (HM y UMG) fue de 2.5 minutos y para el escenario futuro se utilizó la resolución de 30 segundos. Las variables actuales utilizaron los dos niveles de resolución permitiendo establecer la base para las proyecciones pasadas (2.5 minutos) y futuras (30 segundos).

Estimación de la Superficie Actual de *P. chihuahuana*

Para estimar la superficie de la distribución actual se usó el paquete alphahull de R (Pateiro-López y Rodríguez-Casal, 2010). El valor de α fue definido con base en el nivel de ajuste sobre los registros de ocurrencia; de modo que valores pequeños de cada registro tiende a formar un polígono y un valor de α grande tiende a sobrestimar. La distribución de *P. chihuahuana*, en algunas zonas está formado por varias poblaciones, en otras es solo una población aislada, para esta situación el valor de α con mejor ajuste fue de 0.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diferencias y Similitudes entre Poblaciones

El análisis muestra que los dos primeros componentes principales concentraron el 71 % de la variabilidad total. El primer componente identificó la influencia de dos grupos de variables ambientales los cuales separaron las poblaciones de *P. chihuahuana* (Cuadro 8).

Las variables Bio2, Bio4, Bio5, Bio7, Bio8 y Bio10 conformaron un primer grupo; en contraparte las variables Bio6, Bio12, Bio16 y Bio18 conformaron el segundo grupo. Estas diferencias y similitudes ambientales definieron cinco poblaciones de *P. chihuahuana* determinadas por precipitaciones altas, temperaturas mínimas menos extremas, rango diurno de temperatura y rango anual de temperatura.

El componente 2 presentó influencias en los valores de temperatura. Las variables Bio1, Bio9, Bio3 y Bio11 se asociaron a poblaciones con temperaturas altas. En contraste las variables bio13, bio17 y bio19 se asociaron a temperaturas más bajas. Estos valores de temperatura generalmente se asociaron a la presentación de precipitaciones altas.

Los dos componentes se interpretaron con base en su grado de correlación lineal y el coeficiente que presentaron dentro del eigenvector de cada componente principal. Las cargas o el valor de los vectores según su dirección y magnitud ejercida por cada variable, determinaron el grado de influencia sobre la distribución de las poblaciones de *Picea*. En esta forma, los componentes 1 y 2 agruparon tres poblaciones principales de *Picea* (Figura 5). El estudio se enfocó a identificar las poblaciones específicas que se agruparon

Cuadro 8. Valores de los vectores de cada variable que forman los componentes principales asociado a las poblaciones de *Picea chihuahuana*

Var	Eigenvectores			
	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4
BIO1	-0.0036	-0.2824	0.4931	-0.0603
BIO2	0.3225	-0.0122	-0.0295	0.0496
BIO3	-0.1778	-0.3365	-0.1829	0.1672
BIO4	0.2971	0.1905	0.0617	-0.0617
BIO5	0.3025	0.0038	0.2260	-0.0411
BIO6	-0.2985	-0.1299	0.1751	-0.0399
BIO7	0.3223	0.0731	0.0227	0.0002
BIO8	0.2568	0.0326	0.3615	-0.0915
BIO9	-0.0164	-0.2740	0.3805	0.2752
BIO10	0.2601	0.0128	0.3528	-0.1066
BIO11	-0.2113	-0.2892	0.2910	-0.0226
BIO12	-0.2731	0.2356	0.1518	0.0469
BIO13	-0.1014	0.4086	0.1531	-0.2199
BIO14	0.2079	0.1154	-0.0570	0.4007
BIO15	0.0809	0.0282	-0.0670	-0.6193
BIO16	-0.2787	0.2124	0.1066	-0.1355
BIO17	0.0193	0.3750	0.0905	0.4293
BIO18	-0.2612	0.2528	0.1281	-0.1294
BIO19	-0.1783	0.3192	0.2475	0.2203

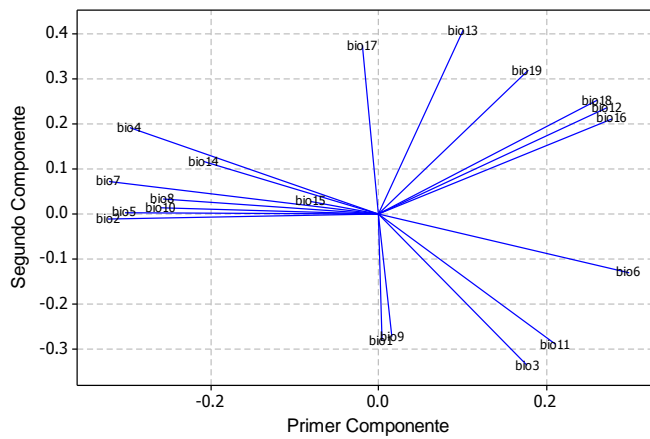
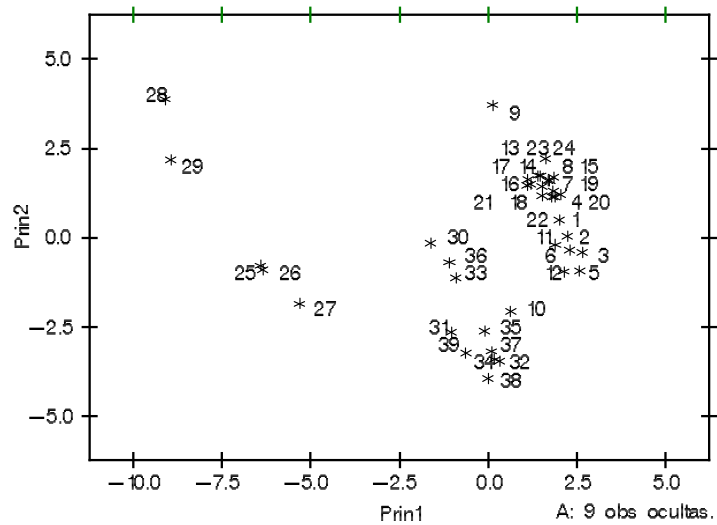


Figura 5. Variabilidad de las poblaciones de *Picea chihuahuana* con base en los dos primeros componentes.

con base a las mayores diferencias y similitudes ambientales. Para este propósito, el análisis clúster identificó tres grupos principales (Figura 6). El grupo 1 integró 23 poblaciones ubicadas geográficamente hacia el norte del área de estudio. El grupo 2 integró 11 poblaciones ubicadas en la región centro, entre los límites de los estados de Durango y Chihuahua. El grupo 3 incluyó cinco poblaciones hacia el sur en el estado de Durango.

Posterior a la identificación de los grupos de poblaciones de *Picea*, el análisis discriminante permitió seleccionar las variables ambientales y el peso de cada variable que mejor agruparon las poblaciones. Con la combinación de las 19 variables ambientales, se seleccionaron 13 variables que mostraron mejor separación de grupos: Bio1, Bio3, Bio4, Bio6, Bio7, Bio9, Bio10, Bio12, Bio13, Bio15, Bio16, Bio17 y Bio18. Sin embargo, las variables con mayor significancia individual fueron Bio4, Bio7 y Bio17 al presentar un $R^2 > 0.70$ ($P < 0.0001$).

Con base a las similitudes de distancia, la mayor diferencia se presentó entre las poblaciones norte y sur, mientras que la menor diferencia se presentó entre las poblaciones centro con respecto a las poblaciones norte y sur (Cuadro 9). Estas diferencias se observaron mediante el análisis de varianza multivariado de grupos (Cuadro 10). Los rangos de temperatura influyeron en la separación y agrupación de las poblaciones de *P. chihuahuana*. Las poblaciones del norte presentaron un rango más amplio, las poblaciones del sur presentaron un rango más estrecho y las poblaciones del centro presentaron valores intermedios de temperatura. Con respecto a la variable precipitación, las poblaciones del sur presentaron el rango más alto, las del norte intermedia y los

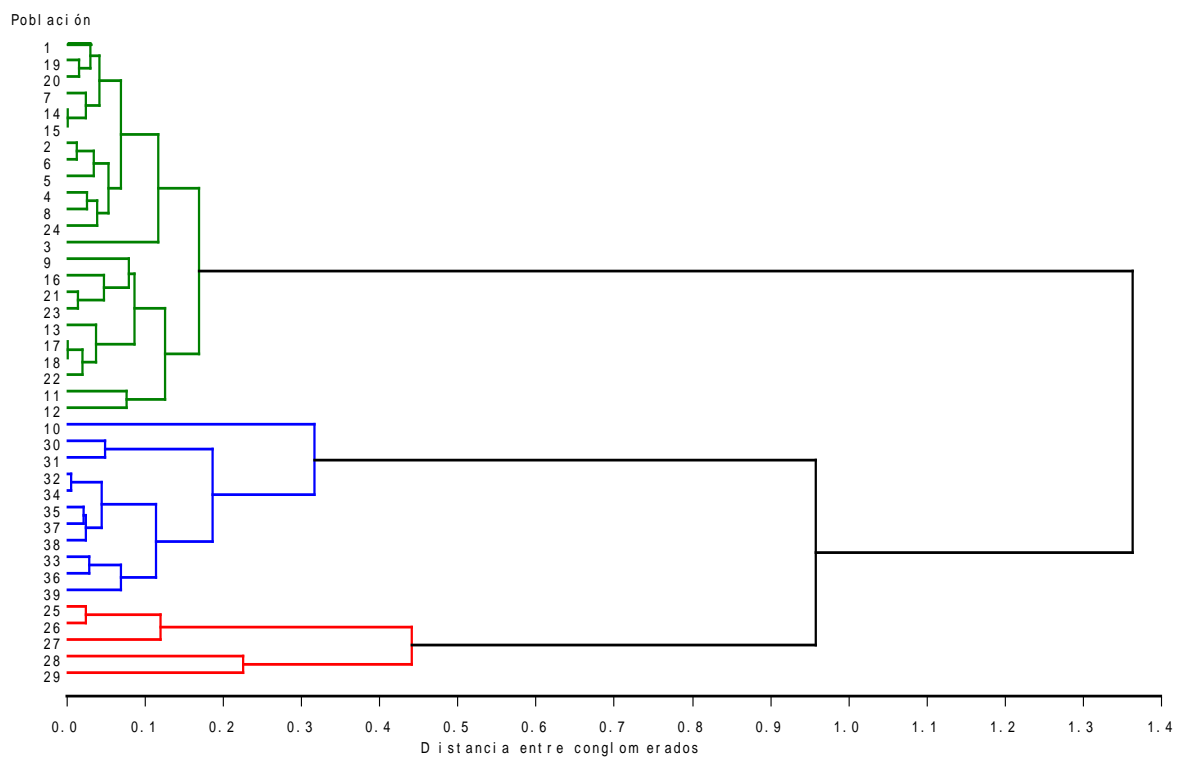


Figura 6. Agrupación jerárquica de poblaciones de *Picea chihuahuana* con base en el análisis clúster con 19 variables climáticas.

Cuadro 9. Distancia de Mahalanobis entre grupos de *Picea chihuahuana*

Grupos	1	2	3
1	0		
2	2506	0	
3	7495	2032	0

Cuadro 10. Estadísticos descriptivos de variables climáticas por grupos de poblaciones estimadas mediante el análisis de varianza múltiple

Variable	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3		
	N	Media	DE	N	Media	DE	N	Media	DE
BIO1	23	11.46	0.59	11	11.80	0.71	5	11.64	0.80
BIO3	23	0.57	0.01	11	0.60	0.00	5	0.60	0.01
BIO4	23	47.57	0.76	11	38.32	1.06	5	30.60	0.91
BIO6	23	-4.56	0.43	11	-3.15	0.61	5	0.30	1.13
BIO7	23	31.64	0.45	11	28.76	0.65	5	22.40	0.82
BIO9	23	10.51	0.61	11	11.73	1.08	5	10.50	1.64
BIO10	23	17.50	0.64	11	16.38	0.77	5	15.20	0.54
BIO12	23	79.84	3.16	11	76.45	4.25	5	108.40	20.48
BIO13	23	215.48	18.33	11	171.64	10.19	5	240.80	30.83
BIO15	23	92.13	5.75	11	88.27	4.05	5	90.40	9.74
BIO16	23	487.35	24.57	11	466.18	23.57	5	659.80	74.89
BIO17	23	52.09	3.67	11	45.36	5.90	5	46.60	15.23
BIO18	23	441.17	23.26	11	412.91	21.40	5	581.40	74.74

rangos más bajos se presentaron en las poblaciones del centro.

En el estudio de Ledig *et al.* (2000) las poblaciones se agruparon en forma similar con base a las variables de latitud y elevación. Las poblaciones del norte se localizaron en elevaciones de 305 m por debajo de las del centro y sur. Con respecto a la altitud, las poblaciones del centro y del sur son más parecidas y diferentes con las del norte. Las variables climáticas también presentaron este comportamiento; mayor similitud entre las poblaciones centro y sur, y diferentes entre las sur y norte. En otro estudio, Jaramillo-Correa *et al.* (2006) encontraron que las poblaciones del sur y centro son diferentes a las norte, al presentar mitotipos diferentes con base en análisis de marcadores mitocondriales. También las poblaciones del norte presentaron mayor diversidad genética que las del centro sur.

Modelos de Distribución Actual

La mayoría de las poblaciones de *P. chihuahuana* se concentran por grupos, pero existen poblaciones aisladas y distantes. Esta condición determina una distribución heterogénea y compleja de las poblaciones. Bajo estas condiciones, una restricción para explicar este tipo de condiciones, es la carencia de resoluciones de 30 segundos en las proyecciones hacia el pasado. En este contexto, se utilizaron las resoluciones del 30 segundos para analizar la distribución actual potencial de *P. chihuahuana* y la resolución de 2.5 minutos para analizar la proyección pasada. El método de alphahull de R fue una herramienta importante para conocer la superficie de *P. chihuahuana* en los modelos de distribución proyectados.

Resolución 30 segundos. El modelo de la distribución potencial actual

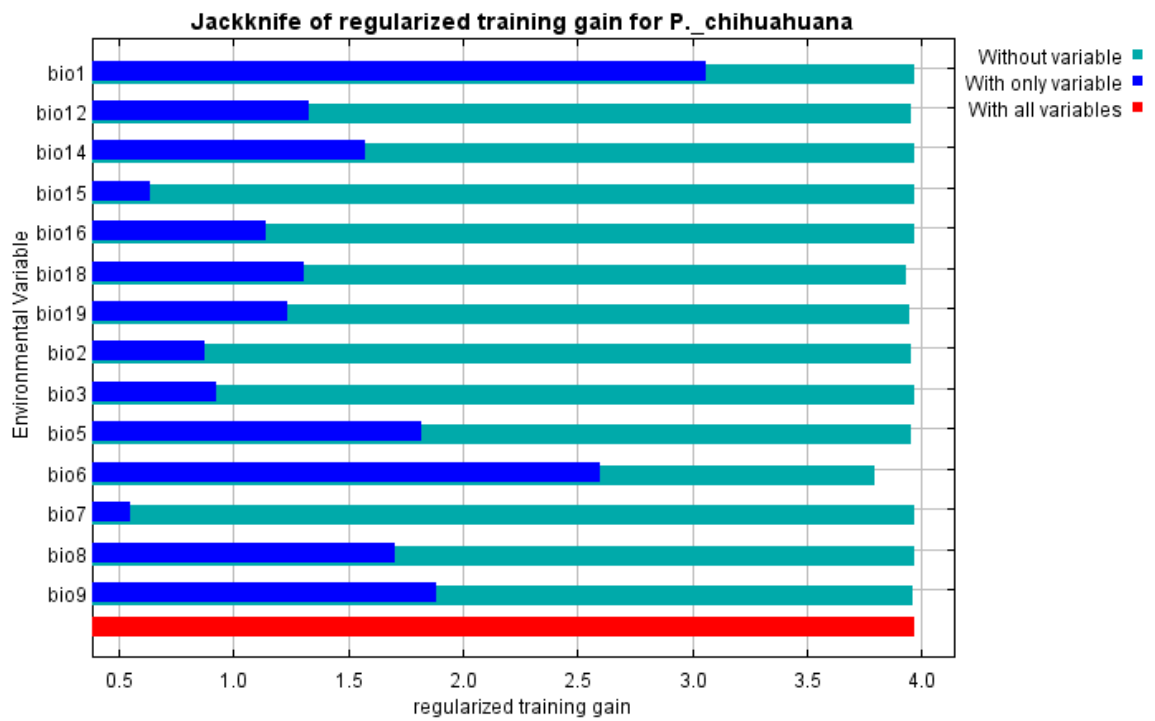
de *P. chihuahuana* presentó resultados satisfactorios con un valor de AUC = 0.992. Las variables Bio6, Bio19, Bio18 y Bio1 fueron las que definieron la distribución de la especie. La contribución acumulativa de estas cuatro variables fue de 91.8% (Cuadro 11). La gráfica de Jackknife (Gráfica 7) mostró una participación sobresaliente de las variables Bio1 y Bio6 (barras azul fuerte). Además de su participación, Bio6 fue una variable interactiva e importante porque su omisión podría reducir la confiabilidad del modelo (barra azul turquesa).

Las curvas de respuesta de cada variable (Gráfica 8) mostraron los rangos donde la probabilidad de ocurrencia se maximiza para la especie. En este análisis solo se describen las cuatro variables que presentaron la mayor contribución para *P. chihuahuana*. La variable Bio6 referida como la temperatura mínima del mes más frío se presentó en rangos aproximados de -5.0 °C con una probabilidad de ocurrencia >0.8. El valor de la precipitación de 130 mm está definida por precipitaciones invernales o en forma de nieve que caracteriza a Bio19 con una probabilidad de ocurrencia >0.60. Valores aproximados se presentaron en las variables Bio18 y Bio1. En la primera la precipitación fue alrededor de los 450 mm y Bio1 presentó rangos de 5 a 10 °C.

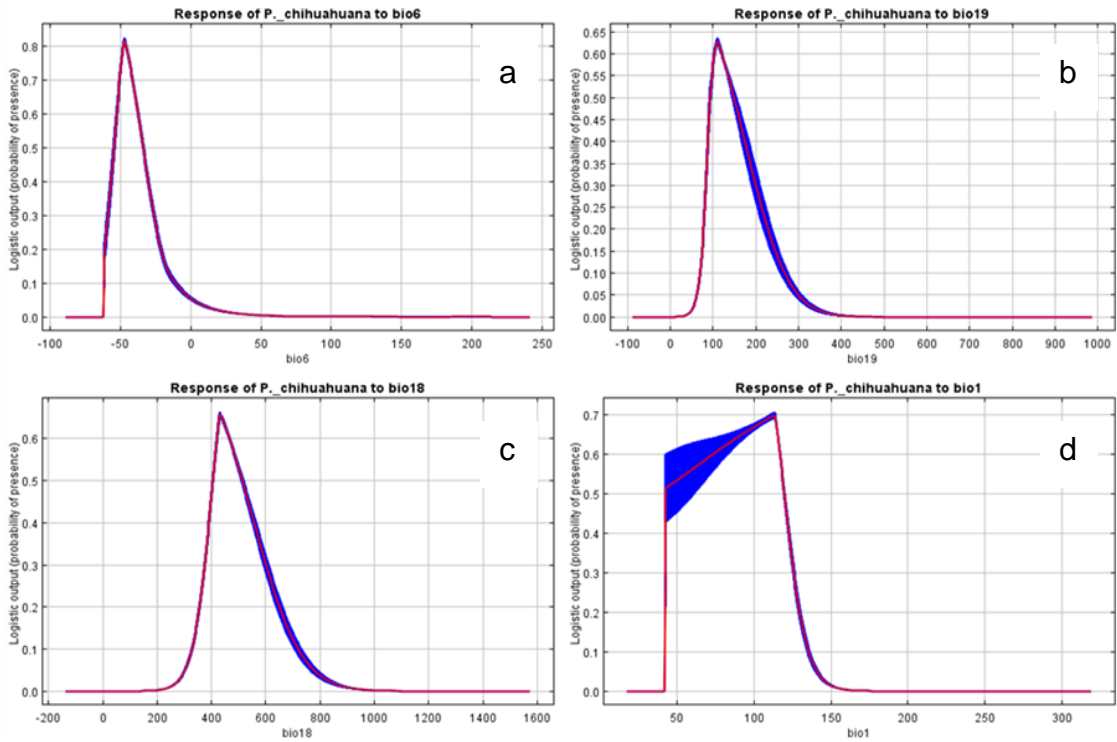
Resolución 2.5 minutos. El modelo de Maxent para *P. chihuahuana* bajo esta resolución presentó resultados satisfactorios, con un valor de AUC = 0.991. Las variables de mayor contribución fueron similares al modelo de resolución 30 segundos; solo se modificó el orden de acuerdo a su contribución; Bio6, Bio1, Bio18 y Bio19 presentaron una contribución acumulativa de 91.7 % (Cuadro 12). De acuerdo al análisis Jackknife (Gráfica 9), las variables Bio1 y

Cuadro 11. Contribución de las variables del modelo de distribución potencial actual de *Picea chihuahuana* de 30 segundos de resolución

Variable	Contribución (%)	Importancia permutación
bio6	50.60	12.70
bio19	16.00	4.70
bio18	13.30	14.50
bio1	11.90	2.20
bio8	3.70	3.40
bio5	1.70	51.90
bio14	1.40	0.10
bio12	0.80	7.70
bio9	0.30	2.00
bio3	0.20	0.20
bio2	0.20	0.50
bio15	0.00	0.00
bio16	0.00	0.00
bio7	0.00	0.00



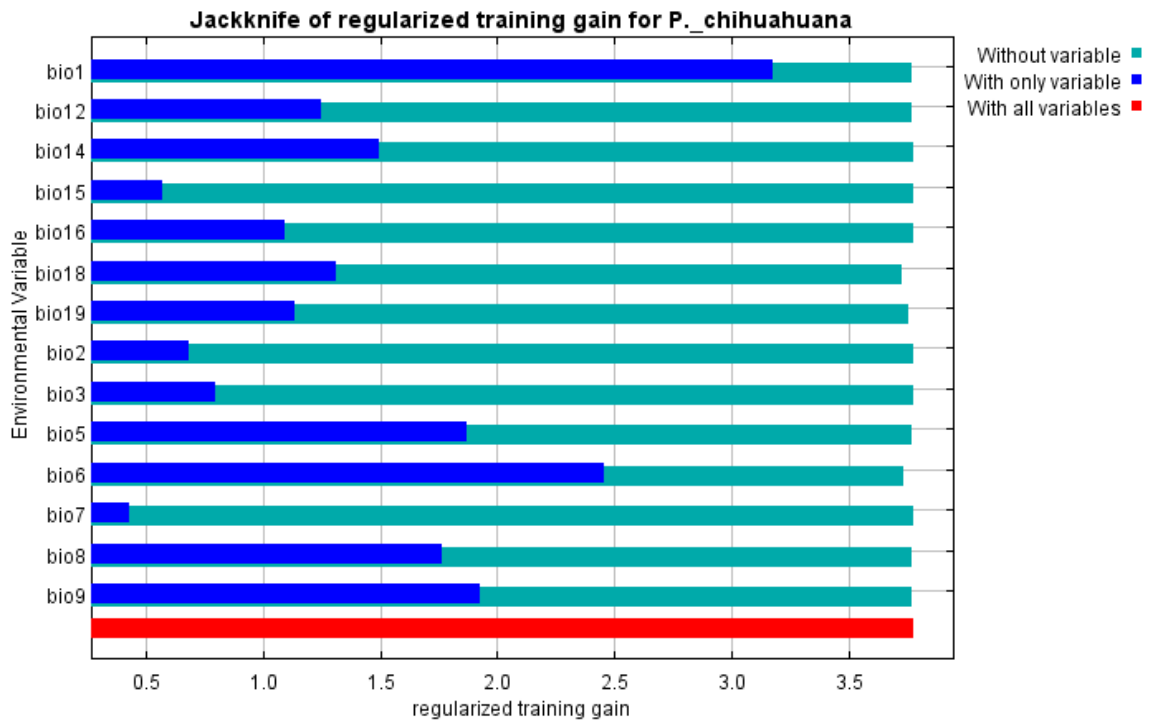
Gráfica 7. Jackknife de las variables analizadas para el modelo de distribución potencial actual de 30 segundos de resolución.



Gráfica 8. Curvas de respuesta de las variables de mayor contribución ante las probabilidades de ocurrencia

Cuadro 12. Contribución de las variables del modelo de distribución potencial actual de *Picea chihuahuana* de 2.5 minutos de resolución

Variable	Contribución (%)	Importancia permutación
bio6	39.10	11.90
bio1	25.70	4.70
bio18	15.00	38.70
bio19	11.90	1.60
bio8	5.50	32.70
bio5	1.10	5.90
bio14	1.10	0.00
bio9	0.50	4.10
bio12	0.10	0.10
bio2	0.00	0.00
bio15	0.00	0.20
bio3	0.00	0.00
bio16	0.00	0.00
bio7	0.00	0.00



Gráfica 9. Jackknife de las variables analizadas para el modelo de distribución potencial actual de 2.5 minutos de resolución.

Bio6 (barras azul fuerte) mostraron una participación sobresaliente aunque las variables Bio18 y Bio19 (barras azul turquesa) fueron indispensables ya que su ausencia podría contrarrestar ligeramente el desempeño del modelo.

Las curvas de respuesta de las variables presentaron ligeras variaciones. La variable Bio6 se presentó en rangos aproximados de $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una probabilidad de ocurrencia de >0.8 . A diferencia del modelo 30 segundos, en esta escala de 2.5 minutos la variable Bio1 fue segunda más importante; su temperatura media anual oscilo en los 11°C con una probabilidad de ocurrencia de 0.7. También cambio el orden de contribución de las variables Bio18 y Bio19, aunque ambas mostraron similares probabilidades de ocurrencias.

En general, los modelos de distribución actual MaxEnt permitieron estimar las superficies de las diferentes poblaciones de *Picea chihuahuana* bajo las condiciones climáticas de su hábitat. Algunas variables en común estimadas en otros estudios presentaron valores similares. En una población de *P. chihuahua* realizada en el estado de Durango, Gordon (1968) reportó una temperatura media anual de $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura máxima de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperatura mínima de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, con base en 15 años de registros de la estación más cercana. En nuestro estudio, la temperatura media anual presentó altas probabilidades de ocurrencia en el rango de 10 a $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los dos modelos de de resolución estudiados.

En otro estudio, Sánchez-Córdova (1984) reportó una temperatura media anual en un rango de 10 a $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperaturas medias máximas de 20 a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperaturas medias mínimas de 2 a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores similares con los estimados en este estudio. Estas temperaturas de mínimas medias son

similares a la temperatura mínima del mes más frío estimada con MaxEnt, y difieren un poco con lo reportado por Gordon (1968) tomando en cuenta que reportó la temperatura mínima.

Distribución Potencial Paleoclimática Estimada

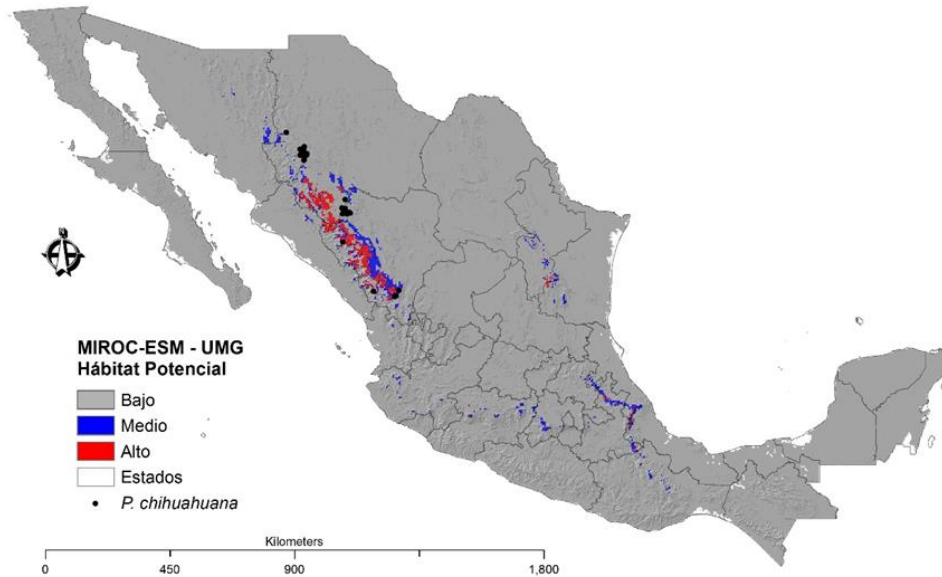
Las predicciones paleoclimáticas (UMG y HM) mostraron una distribución amplia y continua de *P. chihuahuana* a través de la Sierra Madre Occidental. Las áreas de mayor distribución se mostraron en los municipios de Guadalupe y Calvo, Morelos, Batopilas y pequeñas áreas de Guachochi y Balleza, esto en el estado de Chihuahua, incluyendo grandes poblaciones en los municipios de Guanacevi, Santiago Papasquiaro, San Dimas y Pueblo Nuevo a lo largo del macizo montañoso del estado de Durango. En estos municipios, la distribución paleoclimática coincide con las cinco poblaciones actualmente conocidas.

En general, el hábitat proyectado a los periodos UMG y HM mostraron un buen ajuste con valores de AUC >0.991 para los modelos MIROC-ESM y CCSM4 (Cuadro 13). Las variables Bio1, Bio12, Bio14 y Bio15 presentaron la mayor contribución para el modelo MIROC-ESM mientras que las variables Bio6, Bio1, Bio18 y Bio19 fueron las variables que mayor contribuyeron en el modelo CCSM4. Bio1 fue consistente en ambos modelos.

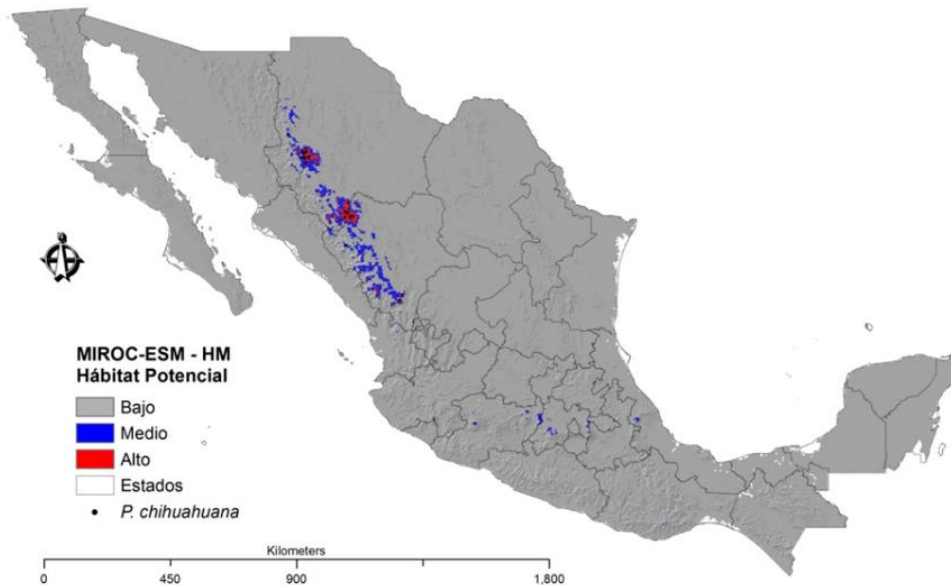
Tendencia y distribución de *P. chihuahuana* de acuerdo al modelo MIROC-ESM. Las predicciones paleoclimáticas a partir del modelo MIROC-ESM para el periodo UMG, mostró un cambio importante en la distribución y una amplia distribución en las poblaciones de *P. chihuahuana*. La Figura 7 muestra la distribución potencial de *Picea chihuahuana* con el modelo MIROC-

Cuadro 13. Ajuste de los modelos al pasado y las variables climáticas de mayor contribución

Periodo	Modelo	AUC	Variables (Bio) de mayor contribución
UMG	MIROC-ESM	0.991	1, 12, 14 Y 15
UMG	CCSM4	0.992	6, 1, 18 Y 19
HM	MIROC-ESM	0.991	1, 12, 14 Y 15
HM	CCSM4	0.991	6, 1, 18 Y 19



(a)



(b)

Figura 7. Áreas de distribución potencial de *Picea chihuahuana* bajo el modelo MIROC-ESM; (a) ultima máxima glaciación, UMG y (b) Holoceno Medio, HM.

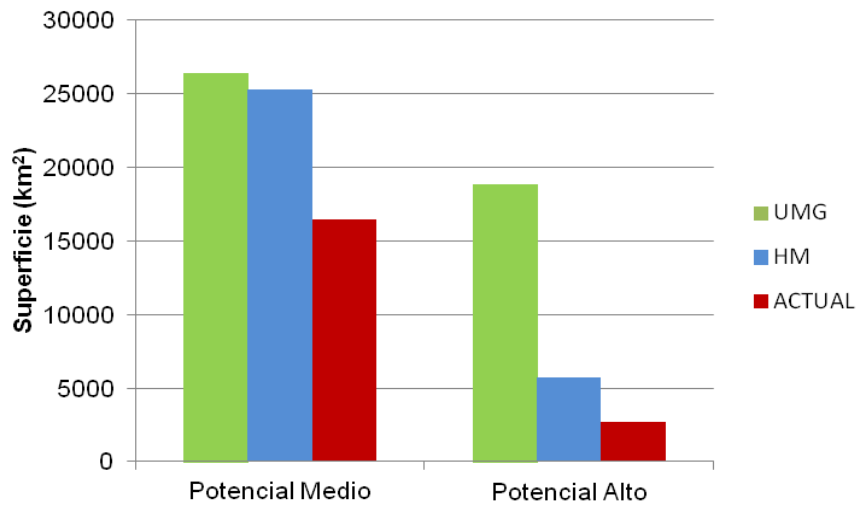
ESM para los períodos UMG y HM. La Figura 7a muestra un tamaño grande y uniforme de distribución potencial alta de las poblaciones a través de la Sierra Madre Occidental, abarcando la región centro sur del estado de Chihuahua y la mayor parte del territorio montañoso del estado de Durango. La influencia del clima predominante en el periodo UMG favorece la presencia de poblaciones potenciales en la orografía de la Sierra Madre Oriental, en los estados de Nuevo León, Tamaulipas en el norte, Veracruz y Puebla hacia el sur del macizo montañoso. Sin embargo, estas dimensiones de distribución potencial y extensión disminuyen notablemente a partir del periodo HM (Figura 7b).

El Cuadro 14 muestra como la superficie de distribución del potencial alto de *P. chihuahuana*, fue siete veces más grande en el periodo UMG con respecto al periodo actual (18,884 vs. 2,682 km²) y tres veces en el HM (18,884 vs. 5,701 km²). La distribución para el periodo HM coincide con la distribución actual de *P. chihuahuana*, pero con una superficie más amplia principalmente para las poblaciones centro y norte. En periodo de UMG se presentaron manchones aislados en los estados de Michoacán, México y Puebla. En general el modelo MIROC-ESM mostró una tendencia descendente de las áreas potenciales de *P. chihuahuana* a partir del periodo UMG (Gráfica 10).

Tendencia y distribución de *P. chihuahuana* de acuerdo al modelo CCSM4. Las predicciones paleoclimáticas para el período UMG mostraron un cambio importante sobre las áreas potenciales de distribución de *P. chihuahuana* y variaciones en la distribución de las superficies en comparación con modelo MIROC-ESM (Figuras 7 y 8). El mapa predictivo de CCSM4 en el

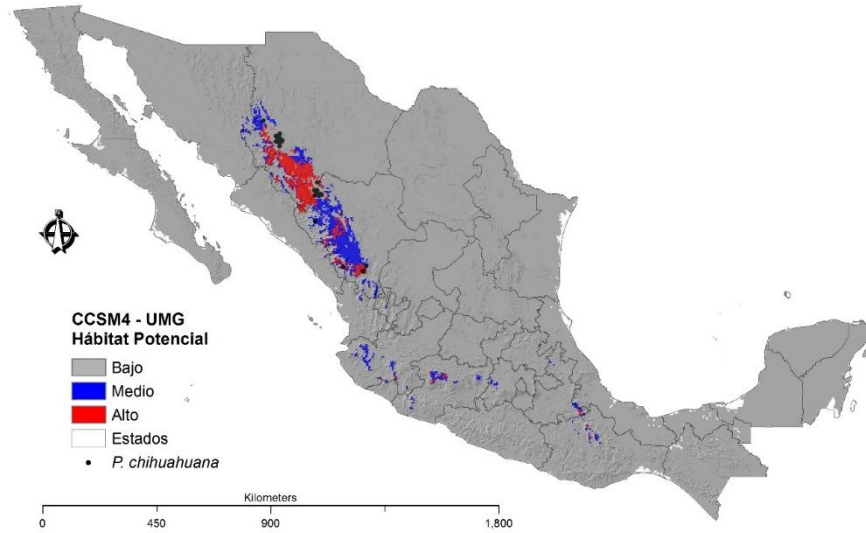
Cuadro 14. Distribución potencial de *Picea chihuahuana* por el modelo MIROC-ESM en los periodos UMG, HM y para la actual

CATEGORÍA	UMG (km ²)	HM (km ²)	ACTUAL (km ²)
Potencial bajo	2203574	2217929	2229737
Potencial Medio	26433	25262	16473
Potencial Alto	18884	5701	2682

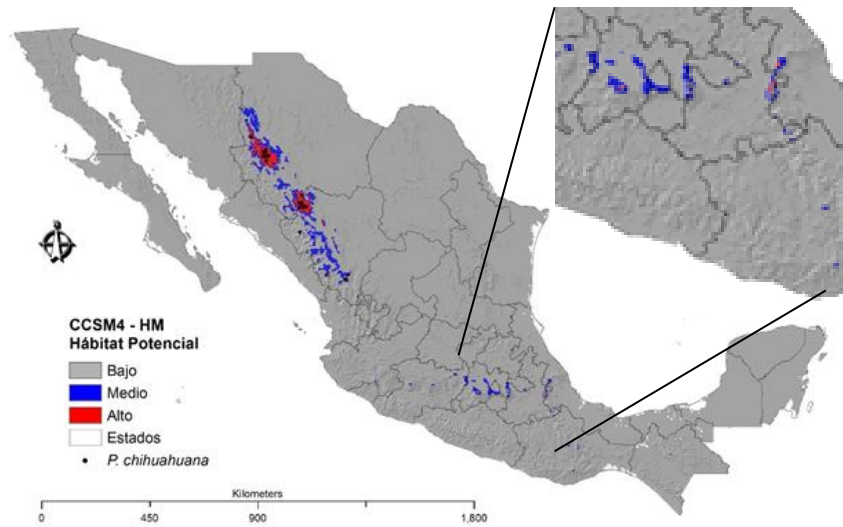


Gráfica
10.

Tendencia del areas de distribución de *Picea chihuahuana* en los periodos de la Ultima maxima glaciacion y para el Holoceno Medio bajo el modelo MIROC-ESM.



(a)



(b)

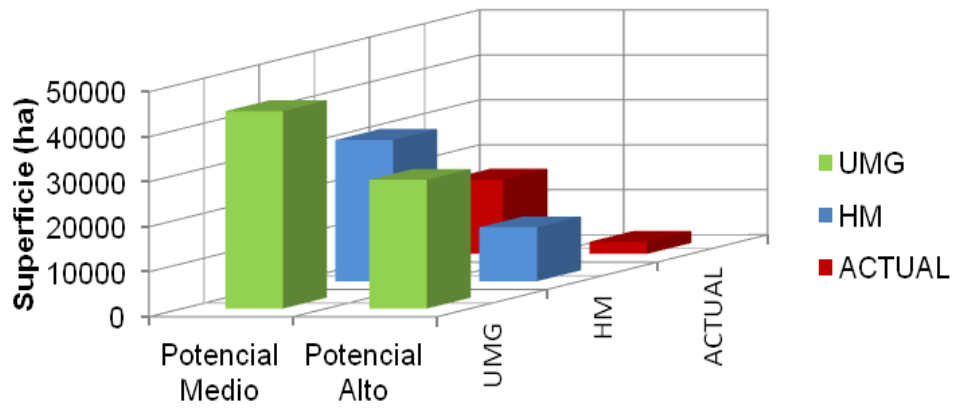
Figura 8. Áreas de distribución potencial de *Picea chihuahuana* con el modelo CCSM; para los periodos (a) última máxima glaciación, UMG y (b) Holoceno Medio, HM.

periodo UMG mostró mayor superficie de áreas potenciales para *P. chihuahuana* en la región centro sur del estado de Chihuahua, pero con un aislamiento y disminución en el estado de Durango, en esta última con alguna semejanza a la distribución actual de *P. chihuahuana*. La mayor superficie de potencial alto se presentó en los municipios de Guadalupe y Calvo, Guachochi, Balleza y Maguarichi en el estado de Chihuahua, para el estado de Durango solo se presentaron áreas aisladas a través de una franja entre los municipios de Otáez y Santiago Papasquiaro (Figura 8a). También se detectaron áreas potenciales sobre el macizo montañoso de los estados de Michoacán y Jalisco, al igual que el modelo MIROC-ES, mantiene la presencia de áreas potenciales en Oaxaca y Puebla, pero desaparecen las áreas detectadas hacia el norte de la Sierra Madre Oriental de los estados de Nuevo León y Tamaulipas.

Con respecto al período HM, las predicciones del modelo CCSM4 mostraron un cambio importante y una reducción sustancial en el tamaño de la distribución predicha, en comparación con el período UMG (Figura 8a y b). Sin embargo, se mantiene la presencia de pequeñas áreas de distribución en los estados de Veracruz y Puebla. En ambos periodos las distribuciones potenciales de *P. chihuahuana* tienen un mayor movimiento en la latitud norte.

En general, el modelo CCSM4 presentó una tendencia de distribución similar al modelo MIROC-ESM, la disminución de la superficie fue gradual, esta tendencia evidenció la reducción de las áreas potenciales para *P. chihuahuana* con una reducción drástica para el potencial alto en la actualidad (Gráfica 11).

Los dos modelos proyectados al pasado mostraron amplias zonas de distribución para el periodo de la UMG. Esto probablemente coincida con las



Gráfica 11. Tendencia del áreas de distribución de *Picea chihuahuana* en los periodos de la Ultima Maxima Glaciacion y para el Holoceno Medio bajo el modelo CCSM4.

evidencias polinológicas del estudio de Sears y Clisby (1955) quienes afirmaron la presencia de *P. chihuahuana* y su expansión hace 12,500 aP en las regiones de la actual ciudad de México y lago de Chalco. La tendencia observada en los dos modelos para el periodo HM se asocia a la reducción drástica de las distribuciones con potencial alto, en relación al periodo UMG. Esto también concuerda con el estudio de Lozano-García *et al.* (1993) quienes mediante análisis de polen encontraron los últimos registros de *P. chihuahuana* alrededor de 7,000 a 8,000 años, concluyendo con la disminución de sus poblaciones. Ledig *et al.* (1997) consideraron que en ese periodo comenzó el aumento de las temperaturas del clima que provocaron una rápida disminución de esta especie que superó la capacidad de adaptación de la especie por el corto período de tiempo en que sucedió. Por consecuencia actualmente la especie se restringe a áreas ampliamente dispersos en hábitat protegido (Rzedowski, 2006).

Distribución Potencial Futura Pronosticada para el 2050 y 2070

Las variables con mayor contribución en las proyecciones a futuro fueron similares a las obtenidas con los modelos de distribución actual aunque varió el peso de permutación de cada una de ellas. Las variables Bio6, Bio1, Bio19 y Bio18 presentaron la mayor contribución acumulativa y sugiere la interdependencia de *P. chihuahuana* de temperaturas frías asociada a los niveles de precipitación. Las proyecciones fueron consistentes en los dos modelos utilizados, en los períodos considerados y en los cuatro escenarios de forzamientos radiativos con ligeras variaciones en orden. Sin embargo, Las tendencias que se presentaron en los diferentes escenarios de cada modelo fue una disminución considerable de las áreas de distribución para los años 2050 y

2070. En general, la tendencia potencial de cambios en la disminución del tamaño y distribución de las poblaciones de *P. chihuahuana* fue UMG <HM<Actual<2050<2070 lo cual es consistente con tendencia al cambio climático.

Escenarios de *Picea chihuahuana* a 2050. La distribución de *P. chihuahuana* con potencial alto bajo el modelo CCSM4, presentó ligeras disminuciones en la superficie estimadas en los cuatro niveles de forzamiento evaluados, excepto en el CPR8.5. En el escenario CPR2.6, la superficie de distribución fue de 7,301 ha y disminuyó ligeramente en los escenarios CPR4.5 y CPR6.0 (5,949 y 6,400 ha). Las áreas de distribución donde posiblemente *Picea chihuahuana* persistirá para el 2050 se presentó para el escenario CPR2.6 con la mayor superficie. Esto fue proyectado sobre las poblaciones localizadas en los municipios de Bocoyna, Guerrero y Maguarichi, mientras que las poblaciones localizadas entre Chihuahua y Durango sus áreas tienden a disminuir. Este mismo patrón de distribución se presentó para los escenarios CPR4.5 y CPR6.0; sin embargo, bajo el escenario el CPR8.5 todas las áreas potenciales de *P. chihuahuana* desaparecen (Figura 9).

El análisis del modelo HadGEM2-ES mostró tendencias variables en los niveles de forzamiento estudiados. En los escenarios CPR2.6 y CPR4.5 el área de distribución potencial alto fue baja en su superficie (631 ha y 932 ha). En contraste esta superficie aumento en el escenario CPR6.0 (4,868 ha) pero desaparecieron bajo el escenario CPR8.5. Para este modelo, la distribución se presentó solo en los municipios de Bocoyna, Guerrero y Maguarichi. (Figura 10).

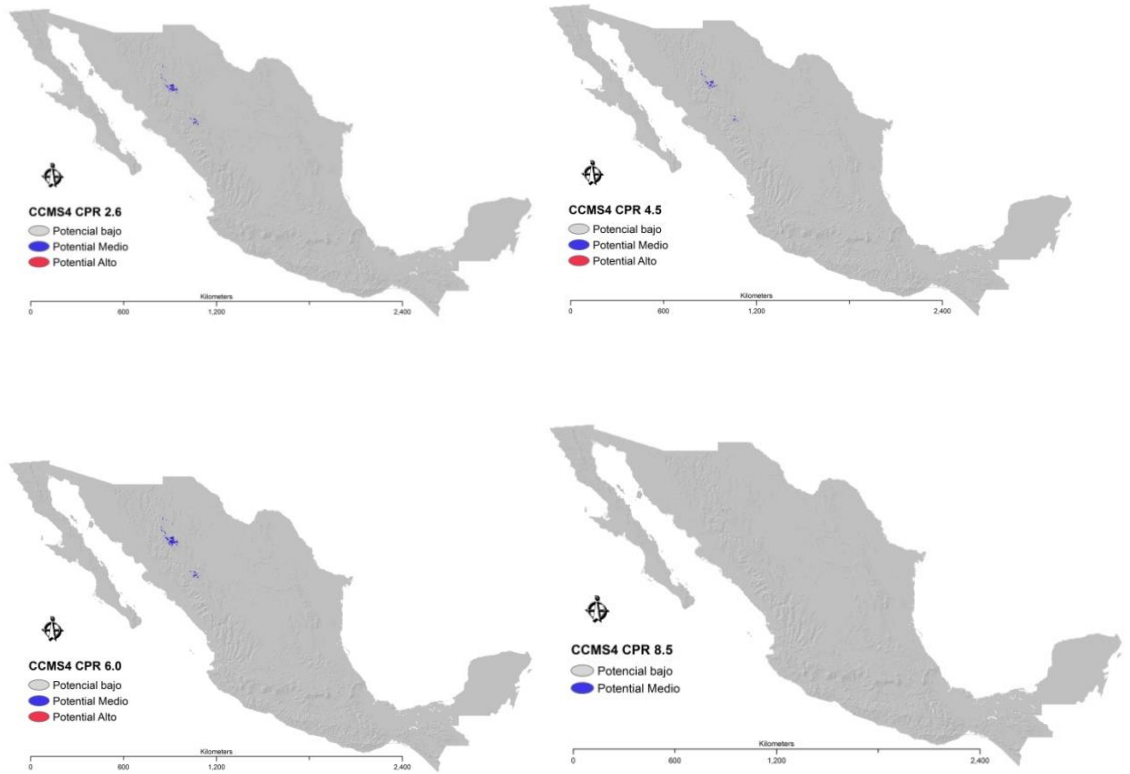


Figura 9. Proyecciones de distribución potencial de *Picea chihuahuana* a 2050 bajo el modelo CCSM4; con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.

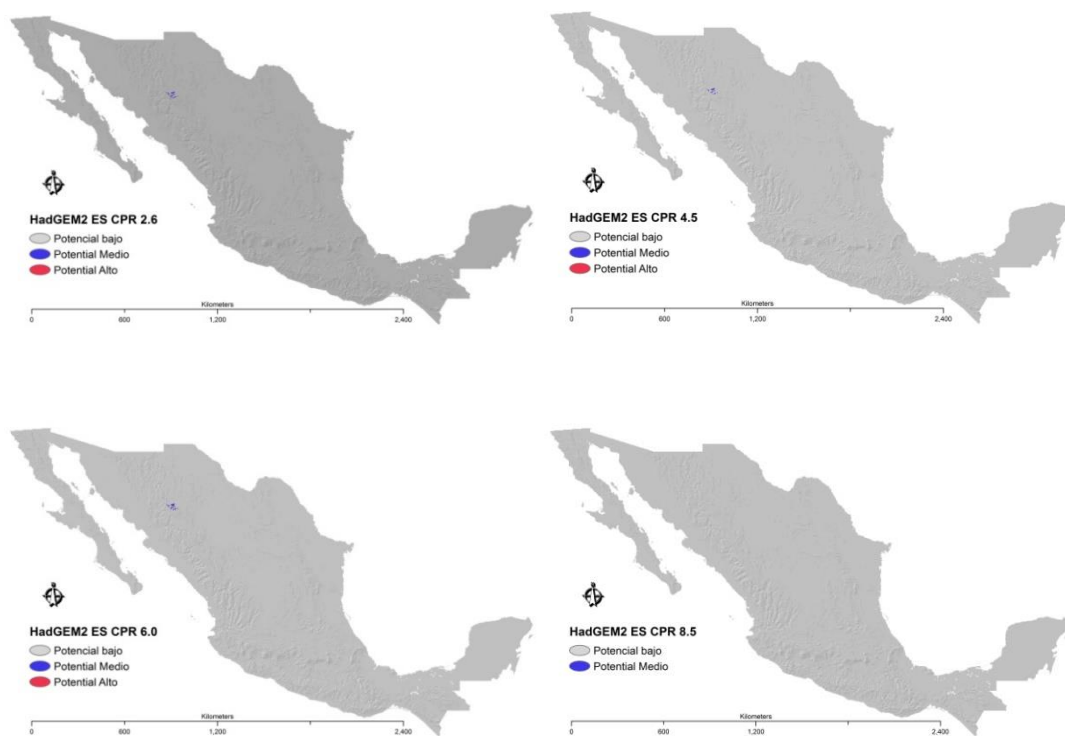


Figura 10. Proyecciones de distribución potencial de *P. chihuahuana* a 2050 bajo el modelo HADGEM2 ES: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.

Escenarios de *Picea chihuahuana* a 2070. Para este periodo, el modelo CCSM4 presentó resultados variables para todos los escenarios de forzamiento evaluados en este estudio. El escenario CPR2.6 presentó la mayor distribución de potencial alto (31,819 ha), el cual se redujo en forma drástica para CPR4.5 (721 ha). Sin embargo en el forzamiento CPR6.0 se incrementó en 1,623 ha y desaparece las probabilidades de distribución en el CPR8.5. El escenario CPR2.6 mostró la mayor superficie estimada, que se localizaron en los municipios de Bocoyna, Guerrero y Maguarichi y en los límites de Durango y Chihuahua. Los escenarios CPR4.5 y CPR6.0 mostraron similar distribuciones a las localizadas actualmente. Para el escenario CPR8.5 las poblaciones se extinguen en su totalidad (Figura 11).

El modelo HadGEM2-ES bajo el escenario CPR2.6 es el única forzamiento que presenta distribución de poblaciones de *P. chihuahuana* hacia el año 2070 (4,056 ha). Esta área, al igual que el modelo anterior, se localizó en las poblaciones del norte actuales (Figura 12).

Superficies Actual, Potencial Actual y de Escenarios

La extensión actual que abarcan los registros de ocurrencia de *Picea chihuahuana* determinada por alphahull fue de 1,296 km². La estimación actual del potencial alto con una resolución de 30 segundos de arco sobrestimó en un 44 % la superficie ocupada por las poblaciones de *P. chihuahuana* (Cuadro 15). Como se esperaba, bajo la resolución de 2.5 minutos se presentó una mayor sobrestimación (107 %), lo cual representó el doble de la superficie de la extensión actual. Aunque las escalas espaciales reflejan diferencias en la estimación de la superficie que actualmente ocupa *P. chihuahuana*, las

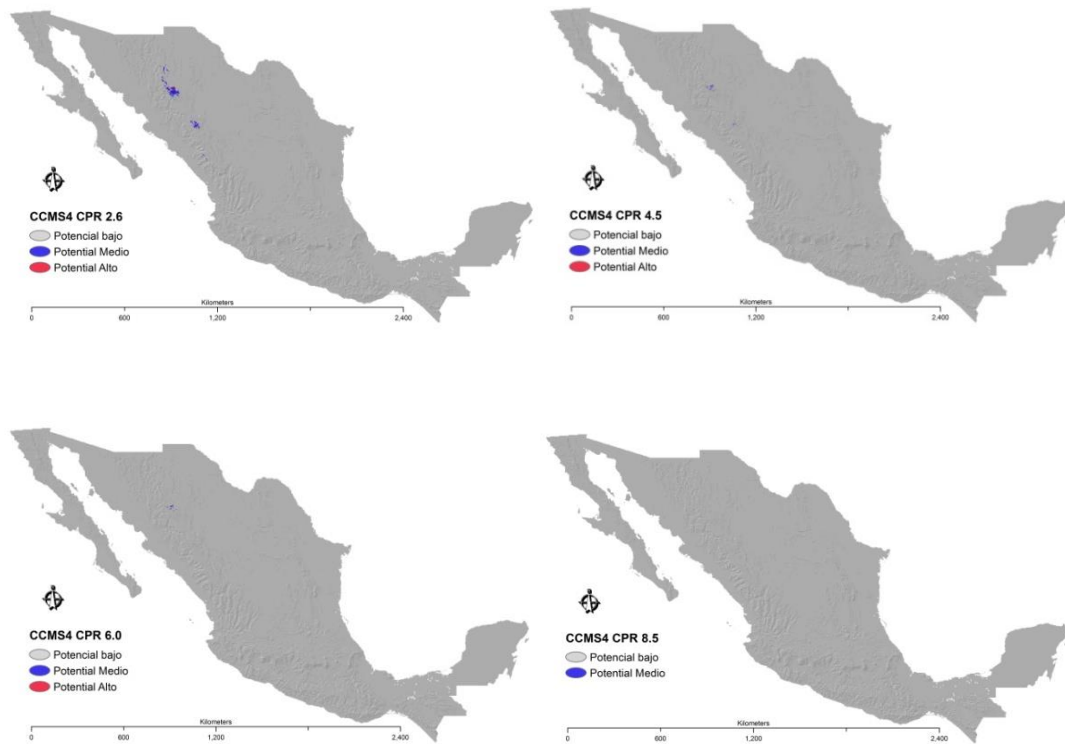


Figura 11. Proyecciones de distribución potencial de *P. chihuahuana* a 2070 bajo el modelo CCSM4: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.

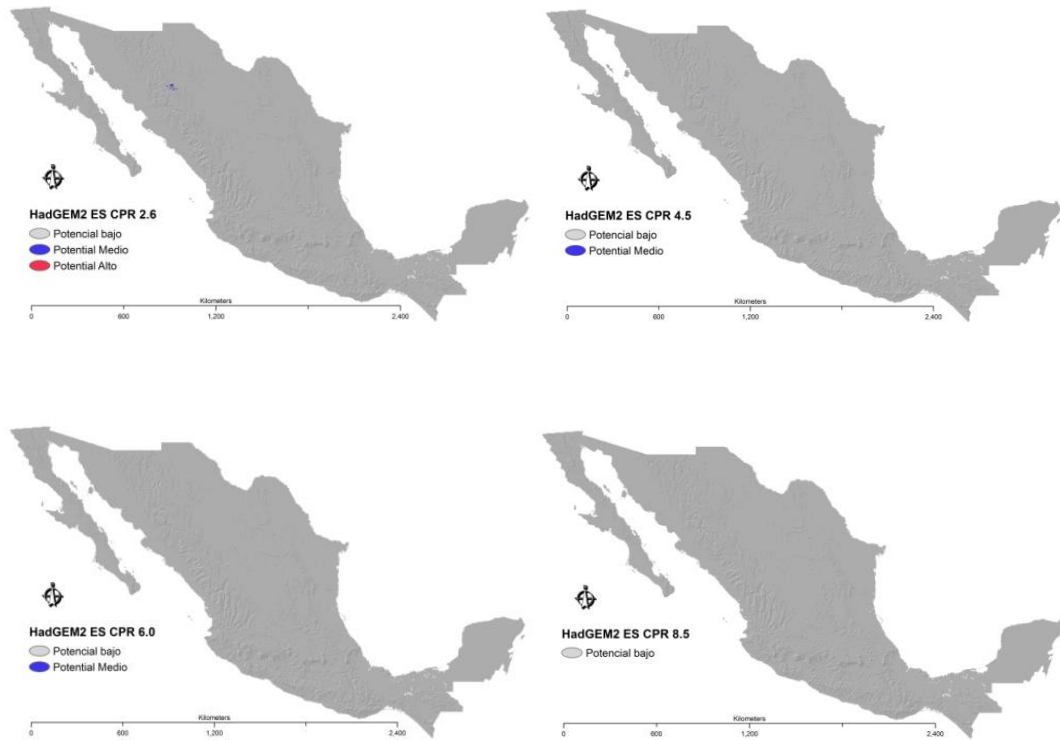


Figura 12. Proyecciones de distribución potencial de *P. chihuahuana* a 2070 bajo el modelo HADGEM2 ES: con los niveles de forzamiento radiativo de CPR2.6, CPR4.5, CPR6.5 y CPR8.5.

Cuadro 15. Comparación paleo climática de las áreas de potencialidad alta de *Picea chihuahuana*

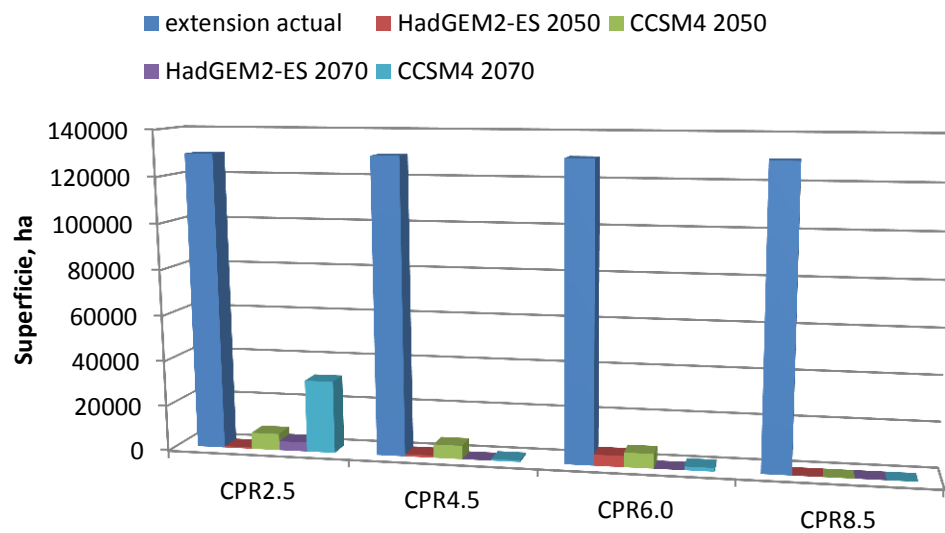
Modelo	UMG	HM	Actual	Extensión actual
MIROC-ESM	18884 (1457 %)	5701 (440 %)	2682 (207 %)	1296 (100 %)
CCSM4	28619 (2208 %)	11989 (925 %)	2682 (207 %)	1297 (100 %)

estimaciones son cercanas a la extensión actual ocupada, siendo la resolución de 30 segundos que presentó mayor aproximación.

Las proyecciones realizadas hacia el pasado, el modelo MIROC-ESM presentó una superficie 14 veces mayor en el periodo de UMG en comparación a la extensión actual y bajo el modelo CCSM4 la estimación fue 22 veces mayor. Para el otro periodo HM; el modelo MIROC-ESM presentó cuatro veces la extensión actual y el modelo CCSM4 presentó nueve veces. El modelo CCSM4 realizó estimaciones de mayor extensión en los dos periodos paleo climáticos. Un aspecto importante es que bajo el periodo HM, el modelo MIROC-ESM presentó una distribución similar a la superficie que actualmente ocupan las poblaciones.

La Gráfica 12 presenta la tendencia de la distribución de las poblaciones de *P. chihuahuana* para los años 2050 y 2070 bajo cuatro niveles de forzamiento radiativo con los modelos CCSM4 y HadGEM2-ES. Las proyecciones bajo los cuatro escenarios de los dos modelos mostraron una tendencia marcada de reducción de áreas de potencialidad alta para los años 2050 y 2070 en relación a la extensión actual ocupada por *Picea chihuahuana*.

El escenario CPR2.5 mostró el menor efecto en la estimación de las superficies de la especie en cuestión. Sin embargo, en este escenario el modelo HadGEM2-ES presentó la menor área de distribución (631 ha). Por otro lado, con el forzamiento extremo de CPR8.5, tanto en los dos modelos como en los dos periodos evaluados se evidenció la desaparición de las áreas de potencialidad alta de *Picea chihuahuana*.



Gráfica 12. Tendencia de las proyecciones a futuro bajo cuatro niveles de forzamiento radiativo de los modelos CCSM4 y HadGEM2-ES para los años 2050 y 2070. La extensión actual es un punto de referencia no evaluada bajo los niveles de forzamiento.

las poblaciones se reducirían para el año 2050 pero se mantendrían hasta el año 2070. Mientras que el otro extremo, si se presentara un forzamiento extremo las poblaciones de esta especie desaparecerían a partir del 2050.

Las proyecciones a futuro mostraron una disminución importante de las poblaciones de *P. chihuahuana* en los diferentes escenarios. Se concluye que si las concentraciones o forzamientos radiativos se mantienen el nivel más bajo

Es importante reconocer que la pérdida de biodiversidad no solo se debe al cambio climático sino también a otros factores asociados, los cuales tienen efectos en corto plazo como el cambio de uso de suelo y fragmentación de hábitat. El análisis realizado sirve como una aproximación para reconocer la severidad de los cambios del clima en la distribución de especies endémicas y en peligro de extinción como la utilizada en este estudio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio utilizó el software MaxEnt para predecir la distribución potencial actual y dos proyecciones, al pasado y al futuro de las poblaciones de *P. chihuahuana*, una especie relicto y en peligro de extinción. Los resultados revelan que los próximos escenarios bioclimáticos habrá un impacto de moderado a alto en las áreas de distribución de *P. chihuahuana* en México.

Las proyecciones paleoclimáticas mostraron una distribución abundante de *P. chihuahuana* principalmente para el periodo con más años al pasado (UMG) seguida del Holoceno Medio (HM), esta tendencia se presentó para los modelos CCSM4 y MIROC-ESM. Estos resultados sustentan las evidencias polinialógicas sobre la abundancia de esta especie hace 12,500 años y su disminución a partir de los años 7000.

En general, la tendencia potencial de cambios a futuro en la disminución del tamaño y distribución de las poblaciones de *P. chihuahuana* fue UMG<HM<Actual<2050<2070 lo cual es consistente con la tendencia al cambio climático. Sin embargo, se observó que en el periodo 2070, las poblaciones de *P. chihuahuana* se extinguen por completo bajo el nivel de forzamiento CPR8.5 en los dos modelos estudiados.

En base a los resultados obtenidos, se recomienda identificar áreas idóneas para establecer planes de conservación en base a los menores impactos que se presentasen a futuro. También se recomienda realizar proyecciones con otros modelos de escenarios de cambio climático con la finalidad de sustentar las tendencias a futuro.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Soto, V., A. Melgoza-Castillo, F. Villarreal-Guerrero, C. Wehenkel y C. Pinedo-Alvarez. 2015. Modeling the Potential Distribution of *Picea chihuahuana* Martínez, an Endangered Species at the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*. 6:692-707.
- Brito, C., E. Crespo y O. Paulo. 1999. Modelling wildlife distributions: logistic multiple regression vs overlap analysis. *22:251-260*.
- García-Arévalo, A. 2008. Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea chihuahuana* Martínez del norte de México. *Polibotánica*. 25:45-68.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, J. Tena-Flores, L. Ruacho-González y I. L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Bot. Mex.* 100:351-403.
- Gordon, A. G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. *Ecology*. 49:880-896.
- Guisan, A. y W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol. Lett.* 8:993-1009.
- IPCC. 2013. Cambio Climático 2013. Bases Físicas. Reporte para tomadores de decisiones. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley, Eds. Cambridge University Press. United Kingdom and New York, USA.
- Iverson, L. R., A. M. Prasad, S. N. Matthews y M. Peters. 2008. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *For. Ecol. Manage.* 254:390-406.
- Jaramillo-Correa, J. P., J. Beaulieu, F. T. Ledig y J. Bousquet. 2006. Decoupled mitochondrial and chloroplast DNA population structure reveals Holocene collapse and population isolation in a threatened Mexican-endemic conifer. *Mol. Ecol.* 15:2787-2800.
- Johnson, D. E. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Internacional Thompson Editores. México.
- Keenan, R. J. 2012. Adaptation of forests and forest management to climate change: an editorial. *Forests*. 3:75-82.
- Ledig, F. T., V. Jacob-Cervantes, P. D. Hodgskiss y T. Eguiluz-Piedra. 1997. Recent evolution and divergence among populations of a rare Mexican

endemic, Chihuahua spruce, following Holocene climatic warming. 51:1815-1827.

- Ledig, F. T., M. Mápula-Larreta, B. Bermejo-Velázquez, V. Reyes-Hernández, C. Flores-López y M. A. Capó-Arteaga. 2000. Locations of endangered spruce populations in Mexico and the demography of *Picea chihuahuana*. 71-88.
- Lozano-García, M. S., B. Ortega-Guerrero, M. Caballero-Miranda y J. Urrutia-Fucugauchi. 1993. Late Pleistocene and Holocene paleoenvironments of Chalco lake, central Mexico. Quatern. Res. 40:332-342.
- Mata, R. M. 2000. Morfogénesis en *Picea chihuahuana*, a partir de Cultivo de Tejidos de Estructuras Inmaduras. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas, UNAM. D. F., México.
- Miyazawa, K. y M. J. Lechowicz. 2004. Comparative seedling ecology of eight north American spruce (*Picea*) species in relation to their geographic ranges. Ann. Bot. 94:635-644.
- Narváez, F. 1984. Contribución al Conocimiento de la Ecología de *Picea chihuahuana*.
- Pateiro-López, B. y A. Rodríguez-Casal. 2010. Generalizing the convex hull of a sample: the R package alphahull. J. Stat. Softw. 34:1-28.
- Patterson, T. F. 1988. A new species of *Picea* (Pinaceae) from Nuevo León, México. SIDA Contrib. Bot. 13:131-135.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura y A. Townsend Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. J. Biogeogr. 34:102-117.
- Peña, D. 2002. Análisis de datos multivariantes. McGraw-Hill. Madrid.
- Quiñones-Pérez, C., S. Simental-Rodríguez, C. Saenz-Romero, J. Jaramillo-Correa y C. Wehenkel. 2014. Spatial genetic structure in the very rare and species-rich *Picea chihuahuana* tree community (Mexico). Silvae Genet. 63:149-159.
- Rehfeldt, G. E., N. L. Crookston, M. V. Warwell y J. S. Evans. 2006. Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States. J. Plant Sci. 167:1123-1150.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Clim. Chang.* 102:595-623.
- Sánchez-Córdova, J. 1984. *Picea chihuahuana*, una Conífera en Peligro de Extinción. *Rev. Ciencia Forestal.* 9:51-63.
- Sears, P. B. y K. H. Clisby. 1955. Palynology in southern North America Part IV: Pleistocene climate in Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 66:521-530.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Villers, L., I. Trejo y J. Martínez. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. 239-254.
- Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg y F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature.* 416:389-395.