

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Modelación de Áreas Potenciales de *Pinus cembroides* Zucc Libres de Presencia de
Dendroctonus spp en México

Por:

CARMELA SANDOVAL GARCÍA

TESIS

Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Modelación de Áreas Potenciales de *Pinus cembroides* Zucc Libres de Presencia de
Dendroctonus spp en México

Por:

CARMELA SANDOVAL GARCÍA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría

Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal

M.C. Héctor Darío González López

Coasesor

Dr. Mario Alberto García Aranda

Coasesor

Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios

Por darme la vida, por cuidarte en todo momento ante las circunstancias y darme fuerzas para poder concluir una de mis metas y gracias a mi familia por apoyo en todo momento durante todos estos años.

A mi Alma Terra Mater

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por ser la institución que me brindó la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniero Forestal y contribuir en mis conocimientos a nivel profesional.

Al Dr. Jorge Méndez González

Gracias por sus conocimientos impartidos durante la carrera y ser motivación a nivel profesional, por ser mi asesor para la realización de este estudio, gracias por su dedicación, tiempo y paciencia brindada en el desarrollo académico y personal al igual manera por brindarme su amistad durante estos años.

Al Dr. Dr. Mario Alberto García Aranda

Por ser mi coasesor y brindarme asesoría, tiempo y conocimientos durante las revisiones de mi tesis y por los comentarios que fortalecieron este estudio.

Al M.C. Héctor Darío González López

Gracias por ser mi coasesor y profesor durante la carrera, y brindarme el tiempo y dedicación durante este tiempo, así como sus comentarios para mejorar mi tesis gracias.

Al Equipo Internacional de Identificación de Plantas de Pastizales (EIIPP)

Por haber formado parte del equipo y por los conocimientos como parte del desarrollo profesional e igual manera a mis compañeros del equipo de diferentes carreras y por brindarme su amistad.

Al Dr. Juan Manual Martínez Reyna

Gracias por brindarme su apoyo y enseñanzas durante los entrenamientos de identificación de plantas de pastizales

DEDICATORIA

A mis padres:

Gracias Feliciano García Pérez por darme la vida, gracias por estar a mi lado a pesar de la distancia, por apoyarme en cada una de mis decisiones y por tu amor incondicional en los momentos difíciles gracias madre mía por siempre motivarme en todo momento y por nunca rendirte.

A Isaías Sandoval Mendoza por su apoyo en todo momento, por ser un ejemplo en mi vida y por su cariño, cuidado y motivación para seguir adelante.

A mis hermanos:

Por ser motivo de inspiración a Celestino Sandoval García por impulsarme a seguir estudiando y apoyarme en todo momento durante la carrera mil gracias, a Rufino Sandoval García gracias por todo el apoyo que me has brindado y por tu motivación a seguir a delante y nunca darme por vencida, a María por ser mi hermana, amiga y confidente de vida a Severiana y Felipe gracias por todos los momentos compartidos que Dios me los bendiga siempre.

A mi abuela:

A mi abuelita Agustina Rojas por su cariño y consejos de vida gracias

A mis sobrinos

Luis Ángel, Alex, Rubí, Ita Savi, Isaías, Romeo, Harim y Carlos gracias por su cariño.

A mis primos:

Mireya, Joel, Uziel, Rafael, Fabián, Carlos gracias por apoyarme en todo momento, por los momentos compartidos y su amistad gracias.

A mis amigos:

Alejandra Torres Rocha por ser mi amiga a pesar de la distancia, Luis Enrique García Jiménez por estar conmigo y ser compañero de muchos años, David Aceves por tu amistad durante la carrera, Marcos Luna por tu amistad en el equipo de pastos, Oscar por apoyarme y estar ahí en todo momento muchas gracias.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	3
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Cambio climático	4
2.2 Importancia de <i>Pinus cembroides</i>	5
2.3 Afectación por <i>Dendroctonus</i> spp en los bosques	6
2.4 Distribución potencial de especies	7
2.5 Modelación de especies.....	8
2.6 Modelos de circulación global.....	9
2.7 Proyecciones con el algoritmo MaxEnt	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 Área de estudio, especies y plaga estudiada	12
3.2 Registros de <i>Pinus cembroides</i> , <i>Dendroctonus</i> spp. y variables para modelación.....	12
3.3 Metodología de modelación	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
4.1 Estadísticos de la modelación en MaxEnt	16
4.2 Variables que contribuyen a modelar la distribución de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus</i> spp	18
4.3 Superficies de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus</i> spp en escenarios actuales y futuros	20

4.4 Mapas de distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> libres de <i>Dendroctonus</i> spp en escenarios futuros	25
4.5 Perfil bioclimático de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus</i> spp.....	30
5. CONCLUSIONES	37
6. LITERATURA CITADA	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables bioclimáticas utilizadas para la modelación de la distribución potencial actual y futura de <i>Pinus cembroides</i> y de <i>Dendroctonus spp.</i>	13
Cuadro 2. Valores de AUC y contribución porcentual de variables tres más importantes en la modelación de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus spp</i> en México, usando dos modelos climáticos.....	18
Cuadro 3. Contribución porcentual de las variables bioclimáticas para modelar la distribución de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus spp</i> en un escenario actual.	19
Cuadro 4. Porcentaje de reducción de superficie de distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> libre de <i>Dendroctonus spp</i> en escenarios futuros con el modelo MIROC 5 en los años 2050 y 2070.....	26
Cuadro 5. Porcentaje de reducción de la superficie de la distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> libres de <i>Dendroctonus spp</i> en escenarios futuros con el modelo HadGEM2-CC para los años 2050 y 2070.....	27
Cuadro 6. Perfil bioclimático de <i>Pinus cembroides</i> en los diferentes escenarios del modelo MIROC5.....	32
Cuadro 7. Perfil bioclimático <i>Dendroctonus spp</i> en los diferentes escenarios del modelo MIROC5.....	33
Cuadro 8. Perfil bioclimático de <i>Pinus cembroides</i> en diferentes escenarios del modelo HadGEM2-CC.....	35
Cuadro 9. Perfil bioclimático de <i>Dendroctonus spp</i> en diferentes escenarios del modelo HadGEM2-CC.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Registros de presencia y superficie ($\text{km}^2 \cdot 1000$) para <i>Pinus cembroides</i> (A y C) y <i>Dendroctonus</i> spp (B y D) en México ante un escenario actual.	22
Figura 2. Superficie ($\text{km}^2 \cdot 1000$) para <i>Pinus cembroides</i> en México en escenarios futuros 2050 y 2070 con el modelo MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).	23
Figura 3. Superficie ($\text{km}^2 \cdot 1000$) de <i>Dendroctonus</i> spp en México para escenarios futuros 2050 y 2070 con el modelo MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).....	24
Figura 4. Superficies ($\text{km}^2 \cdot 1000$) de <i>Pinus cembroides</i> áreas libres de la presencia de <i>Dendroctonus</i> spp con los escenarios MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).	25
Figura 5. Distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Dendroctonus</i> spp ante un escenario actual.	28
Figura 6. Distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> libres de la influencia de <i>Dendroctonus</i> spp en escenarios futuros para 2050 y 2070, modelo MIROC5.	29
Figura 7. Distribución potencial de <i>Pinus cembroides</i> libres de la influencia de <i>Dendroctonus</i> spp para escenarios futuros para 2050 y 2070, modelo HadGEM2-CC.....	30

RESUMEN

Pinus cembroides es una de las especies de mayor distribución en México al tolerar condiciones extremas y a su capacidad de resiliencia ante el cambio climático, posee gran importancia ante a mitigación del cambio climático a través de la captura de carbono. El objetivo de este estudio fue modelar mediante el algoritmo de MaxEnt, la distribución potencial de *Pinus cembroides* (N = 1,244) libres de la influencia de *Dendroctonus* spp (245) en México, usando 19 variables Bioclimáticas, ante escenario actual y futuro de dos modelos climáticos MIROC5 y HadGEM2-CC para los años 2050 y 2070. La validez del modelo se hizo mediante el estadístico de AUC (Área Bajo la Curva). El área potencial libre de plaga se obtuvo mediante algebra de rasters. Los AUC de la modelación de *P. cembroides* y descortezadores fueron > 0.9 . La prueba de Jackknife indica que la variable que modela la distribución de *P. cembroides* y descortezadores es temperatura. El modelo MIROC5 predice que la distribución potencial de *Pinus cembroides* se podría reducir hasta un 98.41 % respecto a su distribución actual en una Ruta de Concentración Representativa (RCP) de 8.5 para el año 2070, sin embargo con el modelo HadGEM2-CC solo se vería reducida en un 76.11 % para (RCP) 8.5 en el año 2070.

Palabras clave: MaxEnt, distribución potencial, MIROC5, HadGEM2-CC.

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son los gases de efecto invernadero más severos que contribuyen en gran porcentaje al efecto invernadero provocando alteraciones en el clima y temperatura en el planeta (Velázquez, 2005). De ellos, el CO₂ siendo el más importante, en los últimos 150 años ha aumentado sus concentraciones a 387 partes por millón (ppm) de partículas suspendidas en la atmósfera (Banco Mundial, 2010).

Los bosques juegan un papel importante en la captura de dióxido de carbono al almacenar este material en su follaje, tronco y raíces e incorporándolos al suelo (Ordóñez y Masera, 2001) lo que beneficia a la mitigación del cambio climático (FAO, 2006). Los bosques de *Pinus cembroides* pueden ser una alternativa viable para la captura de CO₂ ya que puede concentrar el 57 % de carbono en sus hojas y yemas apicales (Pompa y Yerena, 2014) esta especie se ha encontrado en lugares con disturbios, mostrando una resiliencia ante el cambio climático, brindando entre otros beneficios económicos, ecológicos y sociales (Treviño, 2001; Ramírez *et al.*, 2012).

Los bosques de *Pinus* se encuentran en casi todos los estados de México representando el 5 % del territorio (Rzedowski, 1978). La distribución geográfica de *Pinus* y descortezadores del género *Dendroctonus* spp coinciden en todas las cadenas montañosas, siendo el género *Dendroctonus* spp la plaga más dañina (Salinas-Moreno *et al.*, 2010; Castellano *et al.*, 2013) durante los años de 1999 y 2010 el promedio anual de superficie afectada fue de entre 15,000 y 17,689.5 hectáreas en México según un registro

de 2016 (Programa Nacional Forestal, 2014; CONAFOR, 2016). Los estados que presentan un alto riesgo al ataque por *Dendroctonus* spp son: Durango, Chihuahua, Jalisco, Michoacán, México, Oaxaca, Chiapas y Guerrero (CONAFOR, 2017).

Los modelos de distribución potencial han sido herramientas en diversos temas de interés ambiental como identificación de zonas prioritarias para conservación, reforestación, manejo y acciones para evitar que una especie invasora amplíe su distribución (CONABIO, 2014). Existen diversas técnicas y programas para la modelación de distribución como MaxEnt, BIOCLIM, GARP entre otros (Pliscoff y Fuentes, 2011). MaxEnt es uno de los modelos más recomendados ya que permite modelar la distribución tanto para especies de flora como fauna (Morales, 2012).

Existen estudios de modelación para especies de importancia forestal, e-g- Contreras *et al.* (2010) modelaron *Taxus globosa* en México al ser esta una de las especies que se encuentra en un estatus de protección y conservación, García *et al.* (2012) también modelaron *Taxus globosa* en México, Martínez *et al.* (2016) modelaron ocho especies del genero *Abies*, mientras que Aguirre y Duivenvoorden (2010) realizaron la modelación de 56 especies del género *Pinus* en México.

Los conocimientos y herramientas de análisis que han desarrollado las ciencias atmosféricas nos permite simular y estimar el cambio del clima en escenarios futuros a través de los Modelos de Circulación Global (MCG) (INECC, 2014). Los escenarios de mitigación contemplan cuatro rutas de concentración (de CO₂) representativas (rcp`s) de emisiones de gases de efecto invernadero (partículas por millón de dióxido de carbono)

manteniéndolo a menos 2° C para los años 2000_2100: rcp 2.6 430_520 ppm CO₂, rcp 4.5 530 _720 ppm CO₂, rcp 6.0 720 _1000 ppm CO₂ y rcp 8.5 > 1000 ppm CO₂ (IPCC, 2014). Para este tipo de evaluaciones, MaxEnt es una de las herramientas más utilizadas para la modelación de distribución de especies ya que solo requiere registros de presencia (INECC, 2014).

1.1 Objetivo general

Modelar la distribución potencial actual y futura de *Pinus cembroides* libre de la presencia de *Dendroctonus* spp ante dos escenarios de cambio climático en México.

1.2 Objetivos específicos

Modelar la distribución potencial actual y futura de *Pinus cembroides* en México ante dos escenarios de cambio climático 2050 y 2070.

Modelar la distribución potencial actual y futura de *Dendroctonus* spp en México ante dos escenarios de cambio climático 2050 y 2070.

Obtener la superficie de *Pinus cembroides* libre de la probable presencia de *Dendroctonus* spp en México.

Determinar el perfil bioclimático de *Pinus cembroides* y de *Dendroctonus* spp en México,

1.3 Hipótesis

Las variables bioclimáticas predicen adecuadamente la distribución actual y futura de *Pinus cembroides* y de *Dendroctonus* spp, en México, siendo muy probable la reducción de la superficie de *Pinus cembroides* no así para *Dendroctonus* spp.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cambio climático

El cambio climático, ha sido uno de los principales problemas ambientales al aumentar la temperatura en las regiones terrestres (entre 0.4° y 0.8° C) más que en los océanos (1.3 y 2.3 mm/año), aumento del nivel del mar y fenómenos climáticos extremos más eventuales (IPCC, 2013). El calentamiento ha ocasionado impactos ecológicos en el mecanismo de las especies como en el dinamismo de las mismas (Walther, 2010).

Los efectos del cambio climático afectan a los bosques al alterar el crecimiento de los árboles, condiciones climáticas extremas como sequías, inundaciones, tormentas, incidencia de plagas forestales, frecuencia e intensidad de incendios, por ello es importante implementar prácticas para mitigar sus efectos, como la gestión forestal ya que los bosques contribuyen en la mitigación del cambio climático por ello la importancia de la conservación de su biodiversidad en los ecosistemas y especies forestales, ante la adaptabilidad y resistencia en respuesta al cambio climático (FAO, 2010).

Los bosques son una parte muy importante para afrontar el cambio climático, por ello es importante que los bosques se adapten ante las modificaciones de las

temperaturas futuras para mantener a los ecosistemas y especies de mayor importancia y establecer medidas de adaptación para resistir al cambio climático manteniendo la función de los servicios ecológicos de los bosques y establecer medidas para su adaptación mediante los conocimientos científicos, estos ecosistemas serán afectados por el cambio climático, por las sequías extremas, inundaciones, plagas (insectos), incendios entre otros (Locatelli *et al.*, 2009).

2.2 Importancia de *Pinus cembroides*

Los bosques de pinos en México ofrecen grandes beneficios al ecosistema como a la sociedad al proveer servicios ambientales como, captura y almacén de carbono, regularización de temperatura además de un valor escénico por la diversidad que habitan en ella (CONABIO, 2004). Los bosques de *Pinus cembroides* son de gran importancia en el ecosistema como en el ciclo hidrológico al infiltrar el agua al suelo recargando los mantos acuíferos, también evita la erosión del suelo y contribuye al 90 % del alimento de la fauna en su hábitat (Constante *et al.*, 2009).

Pinus cembroides es una de las especies con mayor distribución en México, las mayores concentraciones de poblaciones se encuentran en: Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Zacatecas, es un árbol perennifolio de 5 a 10 m de altura, hojas en grupos de 2 a 3 acículas, especie piñonera (su semilla tiene un valor comercial), esta especie es muy resistente a temperaturas extremas, de lento crecimiento y presenta un alto valor de supervivencia y regeneración (CONAFOR, 2001).

Esta especie es implementada para la reforestación de áreas degradadas, el establecimiento de plantaciones de esta especie puede ser una alternativa económica mediante los servicios ambientales como captura de carbono y producción de semilla (Pompa y Yerena, 2014). En el norte del país esta especie ocupa gran relevancia en la economía de la sociedad al proporcionar leña, madera entre semillas comestibles y como producto secundario la obtención de resina (Sánchez, 2008).

2.3 Afectación por *Dendroctonus* spp en los bosques

En los bosques de coníferas, *Dendroctonus* spp se han desarrollado de manera natural e incluso son necesarios para los ecosistemas, un manejo inadecuado, o factores abióticos de estrés pueden ocasionar el aumento de sus poblaciones alterando así los procesos ecológicos y servicios ambientales de los bosques (Cuéllar *et al.*, 2013).

Las prolongadas sequías en los últimos años ponen en una situación vulnerable a los bosques y selvas ante ataque por plagas y enfermedades al ser el principal factor del deterioro de las masas forestales, entre 2004 y 2011 la superficie de afectación fue de 55 mil hectáreas junto con los incendios forestales disminuyeron el potencial productivo de los bosques de los ejidos y comunidades en México, tan solo en 2010 y 2012 se trataron 85,000 hectáreas afectadas por *Dendroctonus* spp (CONAFOR, 2012).

Las condiciones actuales del cambio climático son un problema para los bosques ya que al aumentar la temperatura se presentan periodos largos de sequía, los árboles se ven afectados disminuyendo la capacidad para defenderse de plagas como el ataque de

Dendroctonus spp; al incrementar la temperatura las poblaciones de los de plaga aumentan atacando en gran capacidad, el mecanismo de defensa de los pinos es la producción de resinas lo que impide al descortezador penetrar al floema y matar al árbol, en el año 2013 el 12 % de los bosques en México presentaron brotes de *Dendroctonus* spp donde los estados más afectados fueron Durango con el 25 % de sus bosques y Chihuahua el 18 % (Del val y Sáenz, 2017).

2.4 Distribución potencial de especies

Los modelos de distribución potencial nos permiten conocer aquellas áreas cuyas condiciones ambientales permiten el desarrollo de la distribución de poblaciones de una especie (Perosa *et al.*, 2014). Conocer la distribución de especies nos permite generar una base de información biológica que nos facilitara priorizar zonas para la conservación, restauración, manejo de las especies estudiadas y modelación ante el cambio climático (Morales, 2012).

La modelación de especies nos ayuda a determinar el hábitad idóneo para el desarrollo de una población o comunidad de una especie concreta, se puede explicar en valores binarios donde 1 indica las áreas idóneas y 0 áreas no idóneas dependiendo el rango, de menor a mayor grado de idoneidad en el territorio, existen factores que afectan en gran medida la precisión de los resultados como lo son: a) la calidad de los registros de localización de la especie, b) las variables seleccionadas y c) la selección del logaritmo o método estadístico (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007).

La distribución de las poblaciones vegetales que predicen los modelos deberá tener la capacidad para adaptarse o emigrar, ampliando su distribución en un menor tiempo del que las especies presentan normalmente los modelos de distribución de especies pueden proporcionar información que sintetiza las especies con las variables ambientales (Villers y Trejo, 2000).

2.5 Modelación de especies

Los pinares son importantes dentro de los bosques de México ya que son endémicos abundantes y dominantes por su gran variedad ambiental, el modelado de una especie se da mediante una simulación o formulación matemática para la construcción real que solo se conoce parcialmente, se han aplicado en los últimos años a campos como la ecología, biología de conservación, evolución y a la biogeografía, a estas técnicas se les conoce como modelos de nichos, idoneidad, predictivos del hábitad y distribución de especies la distribución de especie depende de la adaptabilidad que tienen ante el cambio climático, por ello es importante estudiar aquellas especies que son sensibles a los efectos del cambio climático para crear acciones para su conservación (Ávila *et al.*, 2014).

La modelación de especies nos permite crear una base de información relevante que permite tomar decisiones sobre manejo o conservación de algunas especies, conocer las condiciones actuales donde se distribuyen, permite identificar áreas con características ambientales que requieren y si éstas tienen la capacidad de adaptarse en ciertas condiciones ya que cada una tiene características diferentes de tolerancia y esto hace que sean vulnerables al cambio climático (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Los modelos estiman las condiciones ambientales que son adecuadas para una especie mediante la asociación de registros de ocurrencia junto con variables ambientales que puedan afectar a la especie, fisiología y probabilidad de persistencia. Se han aplicado algoritmos de modelos alternativos para clasificar la probabilidad de presencia y ausencia de la especie en función a variables ambientales, algunos métodos estadísticos que se han utilizado son: modelos lineales generalizados (MLG) modelos aditivos generalizados (MAG), máxima entropía (MaxEnt) entre otros (Pearson, 2007).

2.6 Modelos de circulación global

Los modelos climáticos globales (MCGs) son herramientas confiables para la simulación del clima en escalas globales y regionales ante efectos del cambio climático en un escenario futuro, los (MCGs) son confiables para la simulación de la evolución del clima en un futuro ante escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, el fundamento de los modelos consiste en la simulación mediante la observaciones de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie de la tierra, los (MCGs) nos permiten conocer la evolución del cambio climático causada principalmente a las actividades androgénicas (Rodríguez, 2013).

Cavazos *et al.* (2013) evaluaron el desempeño de (MCG) para México mediante métricas climáticas (ciclo anual, errores y series del tiempo) como temperatura promedio del aire y precipitación, se evaluaron también los índices climáticos extremos mediante un análisis de umbral actual y futuro de la precipitación (valores máximos y mínimos) los escenarios son proyecciones climáticas bajo forzamientos radiativos, llamados Rutas

Concentración de Representativas (RCP) y toman valores de (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, y RCP 8.5) (Fernández *et al.*, 2015).

Los RCP's tienen como objetivo proporcionar proyecciones de concentraciones de gases de efecto invernadero respecto al tiempo, además lo enfatiza a largo plazo en resultado al forzamiento radiativo, es decir la trayectoria que se toma con el tiempo para alcanzar ese resultado, el aumento de temperatura para los escenarios futuros de las rutas de concentración representativas son: rcp 2.6 es (0.3 a 1.7 °C), rcp 4.5 (1.1 a 2.6 °C), rcp 6.0 (1.4 a 3.1°C) y rcp 8.5 (2.6 a 4.8 °C) (Collins *et al.*, 2013).

2.7 Proyecciones con el algoritmo MaxEnt

MaxEnt es un programa de aproximación estadística llamada máxima entropía ya que permite hacer predicciones con datos de presencia en comparación con otros modelos donde requieren otras variables dando buenos resultados en comparación de otros modelos estadísticos (Phillips y Dudik, 2008). MaxEnt es una herramienta para la modelación de distribución de especies con múltiples usos y gran aprobación de estudios científicos (Morales, 2012).

Al estimar la probabilidad que requiere una especie en un área de estudio, MaxEnt sujeta restricciones por la información disponible respecto a la distribución observadas de la especie y las condiciones ambientales en toda el área de estudio, MaxEnt ha demostrado

tener un rendimiento óptimo en comparación con métodos alternativos para el modelado de distribución de especies (Pearson, 2007).

El mejor modelo que se ajusta la distribución de una especie y su comportamiento ante el cambio climático es MaxEnt ya que solo requiere registros de presencia el cual permite conocer la distribución geográfica potencial de una especie, estima la probabilidad de ocurrencia sujeta a la condición de cada variable, este algoritmo es considerado como una de las mejores herramientas para la modelación de especies (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007; Morales, 2012; Ávila *et al.*, 2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio, especies y plaga estudiada

El presente estudio se realizó en todo el territorio mexicano el cual se encuentra entre el trópico de cáncer y a sus extremos meridional y boreal a 14° 30' N y 32° 42' N entre una altitud de 500 a 4000 msnm (Rzedowski, 1978). *Pinus cembroides* Zucc. es una de las especies con mayor distribución en el país ya que se encuentra en altitudes de 1350 a 2800 msnm (CONABIO, 2010), esta especie puede desarrollarse en lugares cuya precipitación sea de 350 a 1000 mm en promedio anual y una rango de temperatura de 6 a 28 °C (Rzedowski, 1978) con un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw) (García, 2004). Los *Dendroctonus* spp son insectos de color rojizo de 2.5 a 9 mm que viven de bajo de la corteza alimentándose del cambium, floema y parte del xilema (CONAFOR, 2016); esta especie tienen un rango altitudinal de 1600 a 2800 msnm (Salinas-Moreno *et al.*, 2004) mientras que Cuéllar *et al.* (2013) encontraron brotes de presencia en una altitud de hasta 3260 msnm como nuevo registro para México.

3.2 Registros de *Pinus cembroides*, *Dendroctonus* spp. y variables para modelación

Se obtuvieron registros de presencia de la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS 2009_2014) a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 1,244 registros con coordenadas geográficas de *P. cembroides*, y 245 registros de *Dendroctonus* spp, estos datos fueron verificados y depurados eliminando registros erróneos. Se obtuvieron las 19 capas de variables para la modelación de clima actual de la página web de WorldClim <http://www.worldclim.org/bioclim>, así como las

19 capas variables climáticas en proyecciones a futuro de los modelo MIROC5 con cuatro rutas de concentración representativas (RCP), (rcp 2.6, rcp 4.5, rcp 6.0 y rcp 8.5) y HadGEM2-CC el cual solo contempla dos rcp's (rcp 4.5 y rcp 8.5) (Hijmans *et al.*, 2005).

Cuadro 1. Variables bioclimáticas utilizadas para la modelación de la distribución potencial actual y futura de *Pinus cembroides* y de *Dendroctonus* spp.

Variable	Significado de la variable
Bio 1	Temperatura promedio anual (°C)
Bio 2	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
Bio 3	Isotermalidad (°C)
Bio 4	Estacionalidad de la temperatura (° C)
Bio 5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
Bio 6	Temperatura mínima promedio del periodo más frio (°C)
Bio 7	Oscilación anual de la temperatura (° C)
Bio 8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
Bio 9	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
Bio 10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (° C)
Bio 11	Temperatura promedio del trimestre más frío (° C)
Bio 12	Precipitación anual (mm)
Bio 13	Precipitación del periodo más lluvioso (mm)
Bio 14	Precipitación del periodo más seco (mm)
Bio 15	Estacionalidad de la precipitación (mm)

Bio 16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío (mm)

Tomadas de WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005).

3.3 Metodología de modelación

La modelación de *P. cembroides* y de *Dendroctonus* spp se realizó a través del algoritmo de máxima entropía (MaxEnt versión 3.4.1), el modelo maneja un algoritmo de probabilidad de ocurrencia (Phillips y Dudik, 2008). En el software (MaxEnt) se le asignó una salida tipo logístico, utilizando el 70 % de los registro de presencia para pruebas de entrenamiento y el 30 % para el análisis de la validez del modelo y un máximo de 500 interacciones (Contreras *et al.*, 2010), ejecutándose la prueba de Jackknife para determinar la contribución de cada variable a los modelos generados (Palma y Delgadillo, 2014).

La modelación es ejecutada con las 19 variables bioclimáticas y los registros de presencia tanto para *P. cembroides* como para *Dendroctonus* spp, para los escenarios actual y futuros de cambio climático. Los estadísticos usados para evaluar la calidad del modelo, en base a la bibliografía fueron el AUC o área bajo la curva (Area Under the Curve) ROC (Receiver Operating Characteristic) por ser el más utilizado, donde el análisis indica la probabilidad de que al tomar al azar un par de casos (presencias o

ausencias) el modelo adjuntará un valor mayor a la idoneidad o probabilidad 0 y 1 (Mateo *et al.*, 2011).

Los modelos de distribución generados en MaxEnt se procesaron en ArcGis 10.4.1 mediante una reclasificación a valores booleanos estimando una probabilidad de ocurrencia > 0.5 y posteriormente se realizó una resta mediante álgebra de mapas de las áreas que geográficamente se sobreponen en los diferentes escenarios (distribución de *P. cembroides* menos la distribución de *Dendroctonus* spp) el resultado son cubiertas de distribución idónea para la presencia de *P. cembroides* al escenario actual y futuro libres de la influencia de *Dendroctonus* spp para los modelos MIROC5 y HadGEM2-CC.

Posteriormente se generaron perfiles bioclimáticos para determinar un rango de tolerancia de valores mínimos y máximos de las 19 variables bioclimáticas y los registros de las especies determinando aquellas áreas con condiciones óptimas para la distribución de la especie. Finalmente se hizo el cálculo y análisis de superficies por entidades del territorio Mexicano, de las zonas libres de influencia al *Dendroctonus* spp tanto para el escenario actual como futuros 2050 y 2070.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estadísticos de la modelación en MaxEnt

Los resultado de la modelación de *P. cembroides* y *Dendroctonus* spp arrojaron valores de AUC > 0.9 los cuales se consideran muy buenos en relación a las probabilidades de que la especie se presente en una celda o pixel al azar (Cuadro 2). Para los modelos de cambio climático MIROC5 y HadGEM2-CC el valor de AUC fue de 0.95 para datos de entrenamientos en un umbral de tolerancia de 0.5 tanto para *P. cembroides* como para *Dendroctonus* spp, poco más altos comparados con los valores de AUC de datos de prueba los cuales fueron > 0.91.

Aguirre y Duivenvoorden (2010) realizaron la modelación de *P. cembroides* en MaxEnt donde obtuvieron un valor de AUC de prueba de 0.895 para un escenario actual en el año 2010 que es menor al valor obtenido en este análisis. Ávila *et al.* (2014) modelaron *Pinus herrerae* para el estado de Jalisco obteniendo un AUC de 0.97 considerado muy buen valor, mientras que Cruz *et al.* (2016) modelaron ocho especies de *Pinus*, *P. douglasiana* Martínez, *P. hartwegii* Lindl, *P. leiopyglla* Schiede ex Schltldl, *P. michoacana* Martínez, *P. montezumae* Lamb. *P. pseudostrobus* Lindl, *P. rzedowskii* Madrigal y Caball y *P. teocote* Schiede ex Schltldl y Cham obteniendo un valor de AUC > 0.8.

Ramos–Dorantes *et al.* (2017) modelaron *P. ayacahuite*, *P. cembroides*, *P. chiapensis*, *P. douglasiana*, *P. greggii*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. ocarpa*, *P. patula*, *P. pseudostrobus* y var. *Acapulcensis*, *P. teocote*, *Aies hickelli*, *A religiosa*, y

Pseudotsuga menziesii var. *glauca* donde obtuvieron valores de AUC > 0.9 incluyendo la especie estudiada en este proyecto el cual coincide con el valor de AUC > 0.9.

Las variables de mayor porcentaje de contribución para la distribución de *P. cembroides* coinciden en los modelos MIROC5 y HadGEM2-CC siendo: Bio 1 (Temperatura promedio anual °C), Bio 9 (Temperatura promedio del trimestre más seco °C) y Bio 10 (Temperatura promedio del trimestre más cálido °C), siendo el modelo HadGEM2-CC el que reporta un mayor porcentaje de contribución con 73.3 % de las tres variables de mayor importancia para la distribución de la especie y el 72.8 % para el modelo MIROC5, en cambio para la distribución del *Dendroctonus* spp solo una sola variable coincide en las distribuciones para ambos modelos de cambio climático la Bio 5 (Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C).

El modelo HadGEM2-CC obtuvo el mayor porcentaje de contribución con el 76.3 % de las tres variables de mayor importancia para la distribución *Dendroctonus* spp en comparación con el modelo MIROC5 que obtuvo el 63.3 %, como se puede observar en el Cuadro 2 en el modelo HadGEM2-CC se observan buenos AUC, es decir buena modelación tanto para *P. cembroides* como *Dendroctonus* spp.

Romero y García (2013) mencionan que para la distribución de los bosques de *Pinus cembroides* y la vegetación asociada las variables de mayor respuesta son: altitud, temperatura media anual y exposición sur y suroeste, el cual coincide con la variable temperatura promedio anual de la modelación de este estudio. Ramos–Dorantes *et al.* (2017) coinciden en que la variable Bio 1 (Temperatura promedio anual °C) contribuye a

la distribución de *P. cembroides* en México, confirmando y coincidiendo las variables obtenidas en la modelación de esta especie.

Cuadro 2. Valores de AUC y contribución porcentual de variables tres más importantes en la modelación de *Pinus cembroides* y *Dendroctonus* spp en México, usando dos modelos climáticos.

Especie	Modelo	AUC (D.P.)	AUC (D.E.)	Var	%	Var	%	Var	%
	Circulación de aire (CO ₂)								
<i>P.cem</i>	MIROC5	0.94	0.95	Bio 1	37.8	Bio 9	15.8	Bio 10	18.8
<i>Dendr.</i>	MIROC5	0.91	0.95	Bio 5	30.2	Bio 8	17.9	Bio 13	15.2
<i>P.cem</i>	HadGEM2-CC	0.94	0.95	Bio 1	32.1	Bio 9	24.1	Bio 10	17.3
<i>Dendr.</i>	HadGEM2-CC	0.91	0.95	Bio 5	39.8	Bio 10	24.7	Bio 16	11.8

Donde: *P.cem* = *Pinus cembroides*; *Dendr* = *Dendroctonus*; D.P = datos de prueba; D. E.

= datos de entrenamiento; Var = variables bioclimáticas.

4.2 Variables que contribuyen a modelar la distribución de *Pinus cembroides* y

Dendroctonus spp

En el (Cuadro 3), se observan los porcentajes de contribución de las 19 variables bioclimáticas para modelación de la distribución de *P. cembroides* y *Dendroctonus* spp generadas en Maxent para los modelos MIROC5 y HadGEM2-CC en los años 2050 y 2070 donde se encontró que las variables que modelan pino y plaga, coinciden en los dos modelos siendo estas: Bio 1 (Temperatura promedio anual °C), Bio 9 (Temperatura

promedio del trimestre más seco °C) y Bio 10 (Temperatura promedio del trimestre más cálido ° C). Sin embargo para ambos modelos solo coinciden con una variable la Bio 5 (Temperatura máxima promedio del periodo más cálido °C) para la distribución de *Dendroctonus* spp.

Cuadro 3. Contribución porcentual de las variables bioclimáticas para modelar la distribución de *Pinus cembroides* y *Dendroctonus* spp en un escenario actual.

Variable	MIROC5		HadGEM2-CC	
	<i>P. cembroides</i>	<i>Dendroctonus spp</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>Dendroctonus spp</i>
Bio 1	37.8	2.2	32.1	1.8
Bio 2	0.3	1.4	0.2	3.2
Bio 3	0	1.1	0.1	0.9
Bio 4	8	4.6	6.2	5.4
Bio 5	2.7	30.2	0.7	39.8
Bio 6	1.7	0.4	1.8	0.2
Bio 7	0.1	0.1	0	0.1
Bio 8	1.3	17.9	1.4	2.7
Bio 9	15.8	0	24.1	0.2
Bio 10	16.6	13.7	17.3	24.7
Bio 11	2.8	2.3	2.4	1.2
Bio 12	5.7	0.4	6.7	1
Bio 13	0.1	15.2	0.2	0.7

Bio 14	0	1.5	0.6	0.4
Bio 15	0.5	1.5	0.4	2.7
Bio 16	1.3	0.1	0.9	11.8
Bio 17	0.1	2.1	0	1
Bio 18	0.1	3.1	2.7	1.7
Bio 19	5	2.1	2.3	2.4

4.3 Superficies de *Pinus cembroides* y *Dendroctonus* spp en escenarios actuales y futuros

La superficie de la distribución potencial total actual de *P. cembroides* es de 194,923.88 km² y para *Dendroctonus* spp de 100,018.79 km². Para el cálculo de ambas, se utilizó un umbral de probabilidad > 0.5 siendo Chihuahua, Durango y Zacatecas los estados que coinciden con el mayor número de registros y superficies de *P. cembroides* con 658, 271 y 91 registros y 73010.38, 33066.02 y 23672.68 km² (Figura 1A y 1C). En la Figura 1B y 1D se puede observar que coinciden los estados de Durango, Chihuahua y Oaxaca con el mayor número de registros y superficie de *Dendroctonus* spp. Para los tres estados se encontraron 36, 34 y 31 registros de presencia con una superficie de 21099.51, 18207.94 y 11637.43 km² para el escenario de clima actual.

Aguirre y Duivenvoorden (2010) modelaron la distribución potencial actual de 56 especies de *Pinus* en todo México, entre ellas *P. cembroides* donde obtuvieron una superficie de 278,501.1 km² difiriendo de este estudio, la cual fue de 194,923.88 km², siendo 30 % menor que la reportada por dichos autores. Ramos–Dorantes *et al.* (2014)

realizaron la modelación de 13 especies de *Pinus*, *Pseudotsuga* y *Abies*, utilizando 28 variables, entre ellas Bio 1, Bio 9 y Bio 18, el software MaxEnt y 572 registros de los cuales 24 fueron utilizados para modelar *P. cembroides* en el estado de Puebla, obteniendo una superficie de 1830.55 km², comparada con la de este estudio que fue de 26.08 km² cuya diferencia se atribuye a las variables bioclimáticas y al umbral de corte en que se calculó la superficie.

Duran y Polini (2014) coinciden en que los estados con mayor afectación por *Dendroctonus* spp son Durango con 25 % de sus bosques, Chihuahua con 18 % y Oaxaca como foco rojo de afectación, sin embargo no mencionan un porcentaje de afectación específica para *P. cembroides*. En este estudio aunque no se estimó el grado de afectación para *P. cembroides* se obtuvo una superficie de distribución potencial de dicha plaga, los estados de Durango, Chihuahua, y Oaxaca son los que cuentan con la mayor distribución de *Dendroctonus* spp.

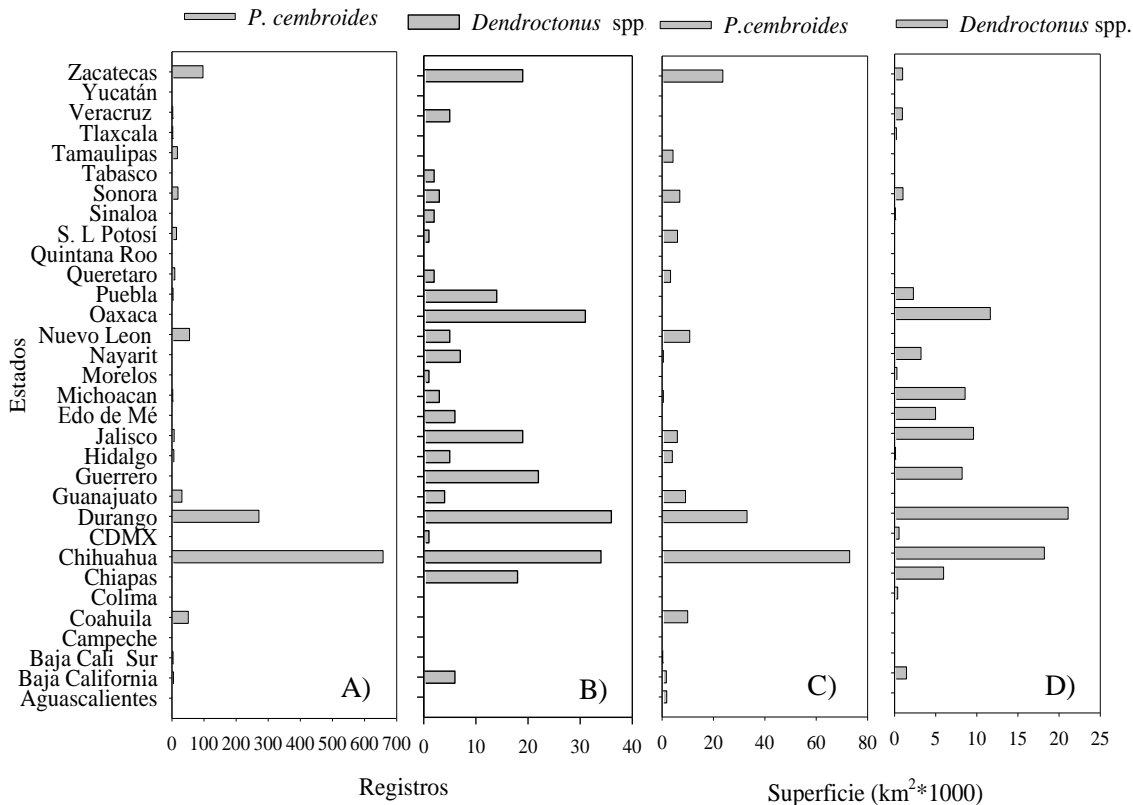


Figura 1. Registros de presencia y superficie ($\text{km}^2 \cdot 1000$) para *Pinus cembroides* (A y C) y *Dendroctonus* spp (B y D) en México ante un escenario actual.

En la (Figura 2) se pueden observar las superficies de *P. cembroides* en proyecciones futuras ante el cambio climático con los modelos MIROC5 (Figura 2A y 2B) y para el modelo HadGEM2-CC (Figura 2C y 2D) en los años 2050 y 2070. La superficie de *Dendroctonus* spp para el modelo MIROC5 se puede observar en la Figura 3A y 3B) y HadGEM2-CC (Figura 3C y 3D).

Existen estudios de proyecciones futuras. Por ejemplo Felicísimo *et al.* (2012) realizaron proyecciones a escenarios futuros para las especies de *P. halepensis* Miller, *P. nigra* Arn, *P. pinaster* Ait, *P. pinea* needles, *P. sylvestris* Litter, *P. uncinata* Mill ex Mirb en otros géneros con dos modelos de escenarios futuros CGCM2 y ECHAM4 donde

señalan que las superficies se verán reducidas ante los efectos climáticos debido a la pérdida de superficie idónea del área, en el análisis de este estudio muestra la misma tendencia ya que se disminuyen las superficies de *P. cembroides* en escenarios futuros, pero es dependiente del modelo y del escenario.

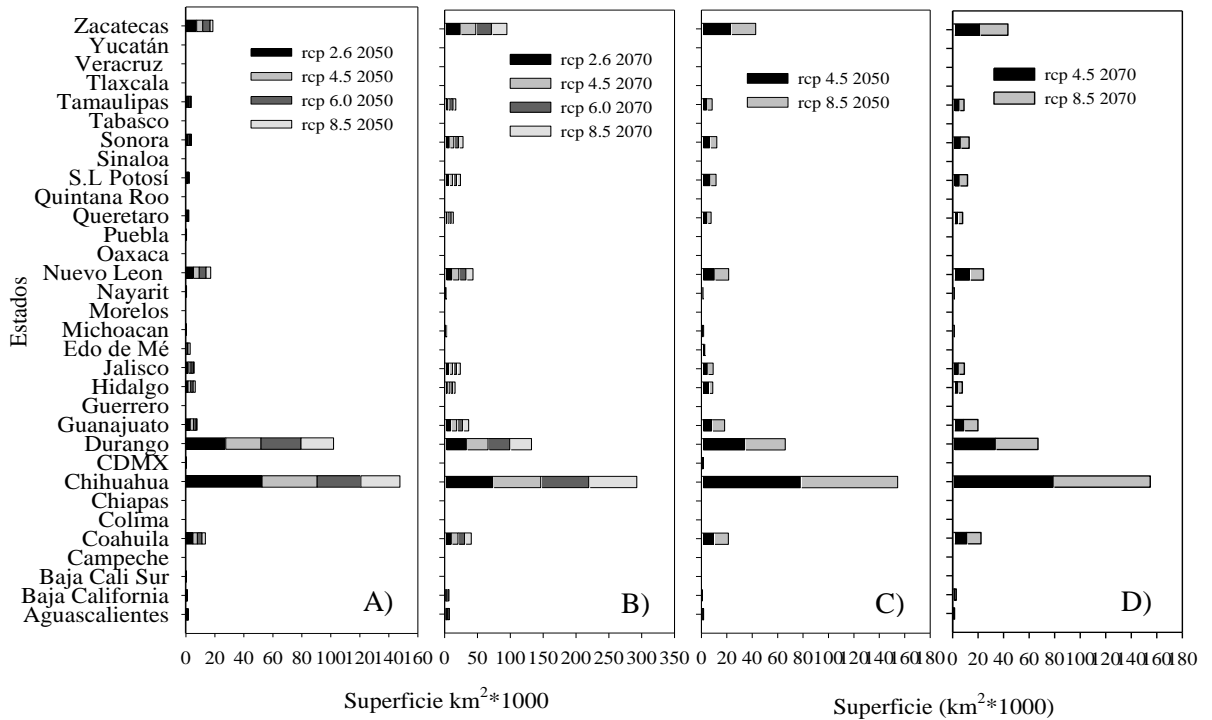


Figura 2. Superficie ($\text{km}^2 \cdot 1000$) para *Pinus cembroides* en México en escenarios futuros 2050 y 2070 con el modelo MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).

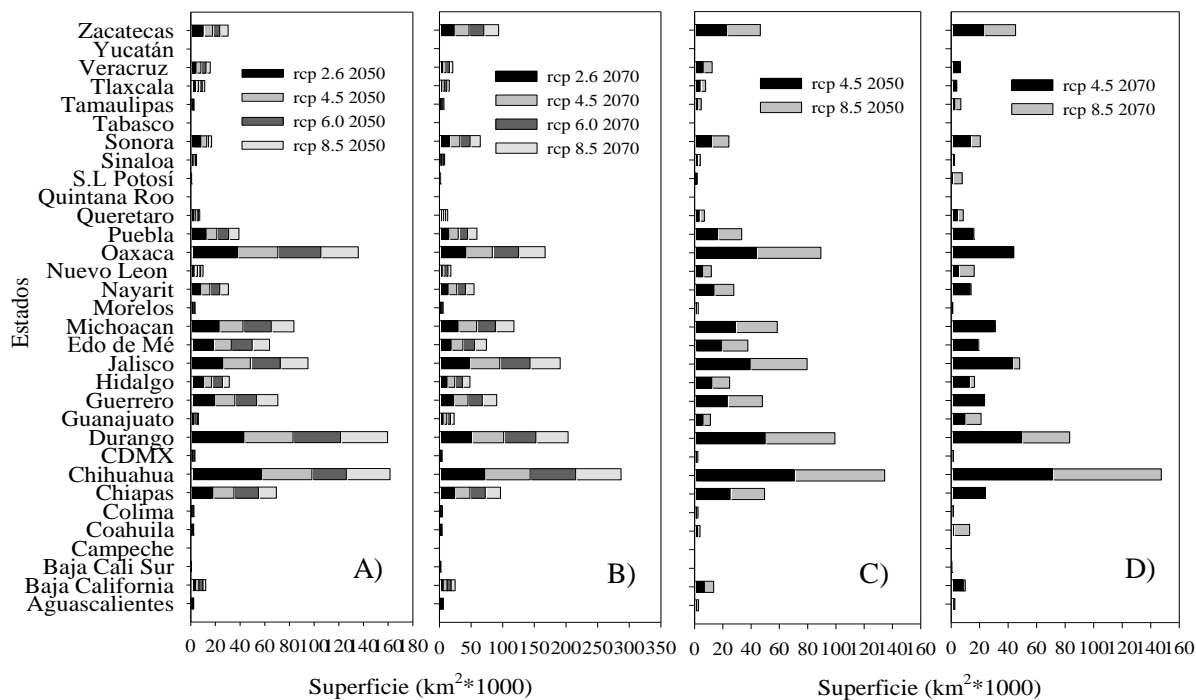


Figura 3. Superficie ($\text{km}^2 * 1000$) de *Dendroctonus* spp en México para escenarios futuros 2050 y 2070 con el modelo MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).

En la Figura 4 se muestran las superficies ($\text{km}^2 * 1000$) de las áreas de *P. cembroides* libres de la presencia de *Dendroctonus* spp en proyecciones futuras ante el cambio climático para los años 2050 y 2070 con los modelos MIROC5 (Figura 4A y 4B) y HadGEM2-CC (Figura 4C y 4D), donde se observa que la superficie de *P. cembroides* se verá reducida considerablemente ante la superficie potencial de *Dendroctonus* spp calculada en un umbral de probabilidad > 0.5 .

Para el modelo MIROC5 se muestran modificaciones de distribución de *P. cembroides* con el 89 % respecto a la superficie actual en un rcp de 2.6 para el año 2050 y en un escenario de cambio climático muy drástico la superficie se reduciría hasta el 98 % en un rcp 8.5 para el año 2070, en contrario al modelo HadGEM2-CC donde la superficie

de la distribución potencial de *P. cembroides* se reducirá en un rcp 4.5 del año 2050 el 72 % en comparación a la superficie actual, y contemplado el escenario más crítico se verá reducido el 76 % en un rcp 8.5 para el año 2070.

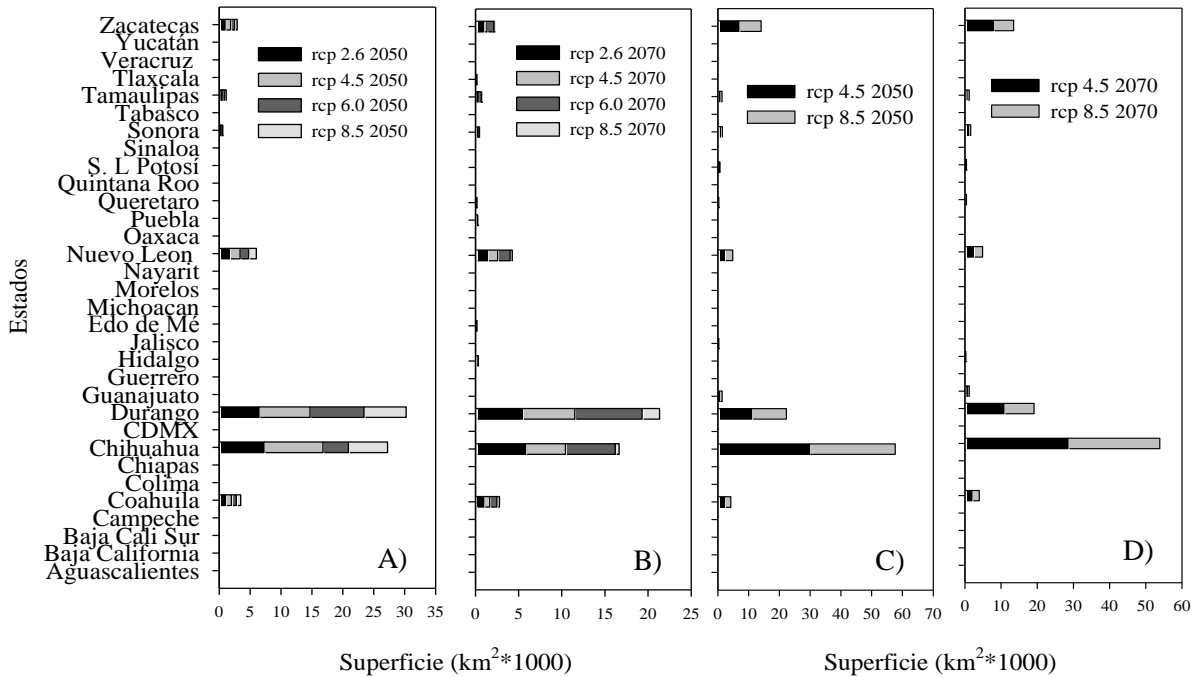


Figura 4. Superficies (km²*1000) de *Pinus cembroides* áreas libres de la presencia de *Dendroctonus* spp con los escenarios MIROC5 (A y B) y HadGEM2-CC (C y D).

4.4 Mapas de distribución potencial de *Pinus cembroides* libres de *Dendroctonus* spp en escenarios futuros

La distribución potencial de *Pinus cembroides* se puede observar en la Figura 5A y en el caso de *Dendroctonus* spp en la Figura 5B, ante un escenario actual. La superficie de la distribución potencial de *P.cembroides* al eliminar la superficie interceptada con la de *Dendroctonus* spp en escenarios futuros con el modelo MIROC5 el cual contempla ocho escenarios (Figura 6A, 6B, 6C y 6D) para el año 2050 y Figura 6E, 6F, 6G y 6H en el

año 2070 las modificaciones más representativas se encuentran en un rcp 4.5 para el año 2050 (Figura 6B) donde se reduciría hasta un 88.71 % de su superficie respecto a la distribución actual, y en un rcp 8.5 en el 2070 (Figura 6H) la superficie se reduciría hasta el 98.42 % siendo el escenario más crítico.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014) menciona al escenario rcp 4.5 como emisiones bajas y al rcp 8.5 como emisiones altas. En la modelación de la distribución de *P. cembroides* con el modelo HadGEM2-CC (Figura 7A, 7B, 7C y 7D) las reducciones de superficie se pueden apreciar en dos escenarios, rcp 4.5 (escenario bajo) en el 2050 la distribución de *P. cembroides* será del 72.01 % menos, en comparación a la superficie actual como puede ver en la Figura 7C y considerando un escenario rcp 8.5 en el 2070 (emisiones altas) su distribución se reducirá hasta el 76.11 % (Figura 7D).

Cuadro 4. Porcentaje de reducción de superficie de distribución potencial de *Pinus cembroides* libre de *Dendroctonus* spp en escenarios futuros con el modelo MIROC 5 en los años 2050 y 2070.

		Modelo MIROC5		
		Escenario	Superficie (km ²)	Reducción (%)
2050		Actual	194923.88	0
		rcp 2.6	17679.22	90.93
		rcp 4.5	21998.21	88.71
		rcp 6.0	16264.04	91.66
		rcp 8.5	15965.66	91.81
2070		rcp 2.6	14954.02	92.33
		rcp 4.5	13306.28	93.17
		rcp 6.0	18038.66	90.75

rcp 8.5

3075.79

98.42

Cuadro 5. Porcentaje de reducción de la superficie de la distribución potencial de *Pinus cembroides* libres de *Dendroctonus* spp en escenarios futuros con el modelo HadGEM2-CC para los años 2050 y 2070.

Modelo HadGEM2-CC			
	Escenario	Superficie (km ²)	Reducción (%)
	Actual	194923.88	0
2050	rcp 4.5	54556.14	72.01
	rcp 8.5	54184.15	72.20
2070	rcp 4.5	54023.78	72.28
	rcp 8.5	46568.61	76.11

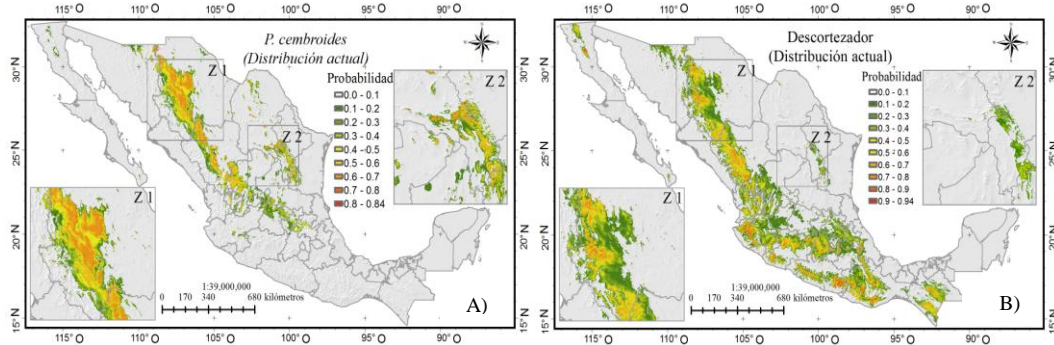
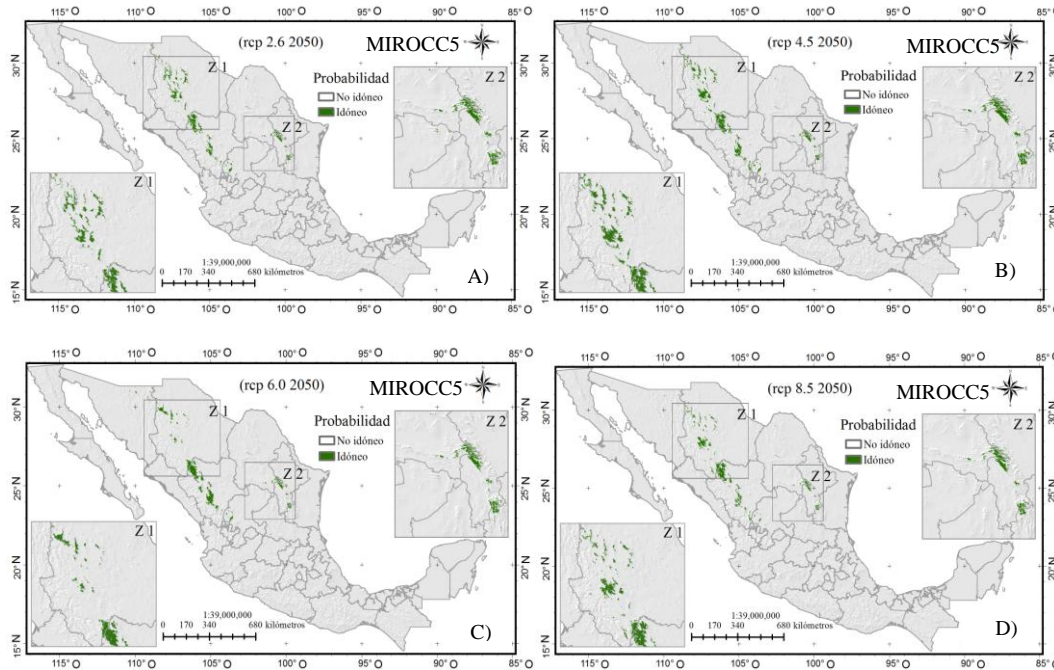


Figura 5. Distribución potencial de *Pinus cembroides* y *Dendroctonus* spp ante un escenario actual.



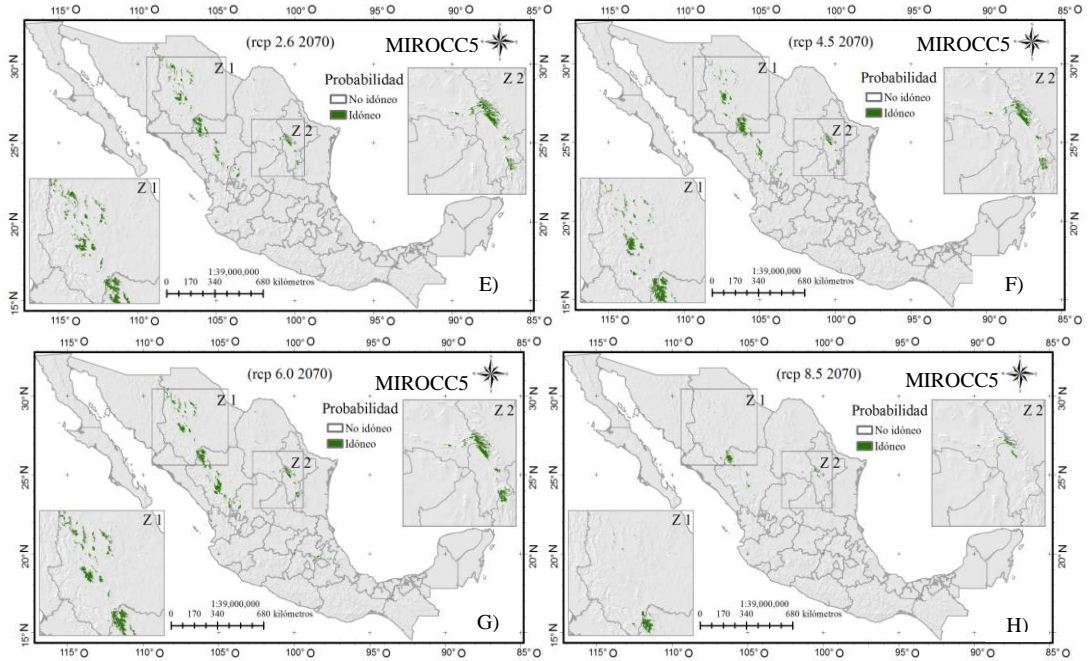
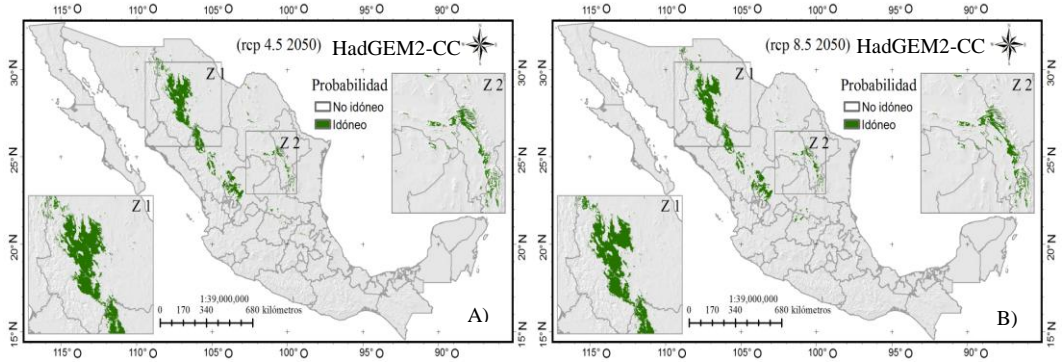


Figura 6. Distribución potencial de *Pinus cembroides* libres de la influencia de *Dendroctonus* spp en escenarios futuros para 2050 y 2070, modelo MIROC5.



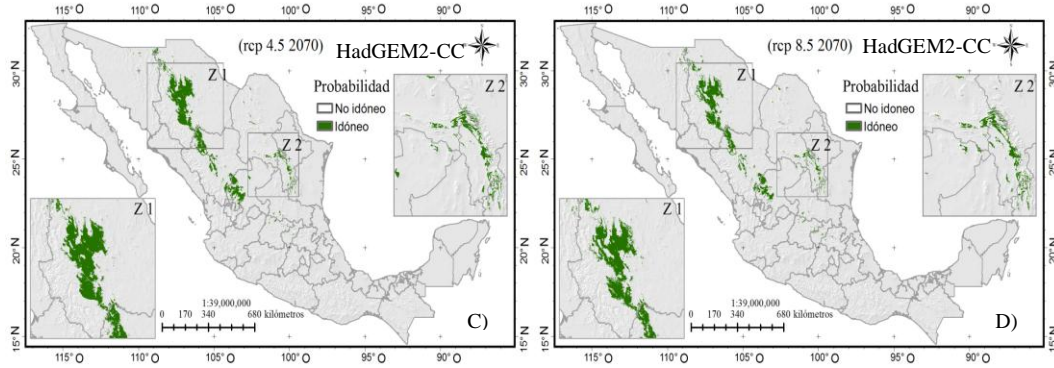


Figura 7. Distribución potencial de *Pinus cembroides* libres de la influencia de *Dendroctonus* spp para escenarios futuros para 2050 y 2070, modelo HadGEM2-CC.

4.5 Perfil bioclimático de *Pinus cembroides* y *Dendroctonus* spp

En los Cuadros 4 y 5 se observan los perfiles bioclimáticos que definen la distribución potencial de *P. cembroides* y *Dendroctonus* spp (MIROC5) y Cuadro 6 y 7 (HadGEM2-CC) en dos escenarios futuros para los años 2050 y 2070 respecto al escenario actual. Las variables con mayor porcentaje de contribución para la distribución de *P. cembroides* fueron: Bio 1, Bio 9 y Bio, las cuales coinciden en ambos modelos, observándose que con el modelo MIROC5 la temperatura aumentaría desde 1.1 a 4.6 °C, sin embargo en el modelo HadGEM2-CC la temperatura aumentaría desde 2.3 hasta 5.8 °C. Mientras que para modelar la distribución *Dendroctonus* spp en los dos escenarios en la Bio 5, Bio 8 y Bio 13, aumenta desde 1.5 °C hasta 3.4 °C con el modelo MIROC5, coincidiendo con el aumento de temperatura estimado con el modelo HadGEM2-CC en la misma variable Bio 5.

Candel *et al.* (2012) modelaron el crecimiento de *P. nigra* en escenarios futuros de cambio climático con los modelos CGM2 y ECHAM4 donde indican que la temperatura aumenta en un escenario futuro (2070) modificando el rango de tolerancia de la especie,

afectando su crecimiento y la fijación de carbono induciendo a la especie a la sequía donde se ve la reducción drástica de las poblaciones llevando al declive la especie.

Cuadro 6. Perfil bioclimático de *Pinus cembroides* en los diferentes escenarios del modelo MIROC5.

variable	Actual	Escenario 2050				Escenario 2070			
		rcp 2.6	rcp 4.5	rcp 6.0	rcp 8.5	rcp 2.6	rcp 4.5	rcp 6.0	rcp 8.5
Bio 1	10.3-20.4	12.1-22.5	12.7-23.1	12.5-22.7	13.2-23.7	12.2-22.6	13.2-23.6	12.8-23.3	14.3-24.8
Bio 2	12.4-19.6	12.7-20.1	12.8-20.5	13.0-20.9	12.8-20.6	12.7-20.4	12.9-20.9	12.8-20.6	13.0-21.2
Bio 3	44-71	44-72	45-71	45-71	45-71	45-71	45-70	44-70	45-71
Bio 4	16.79-70.30	17.90-71.98	18.50-72.36	17.83-73.41	19.24-73.48	18.60-73.20	18.44-73.64	20.06-74.16	19.04-73.94
Bio 5	21.5-34.4	24.1-36.5	24.7-37.2	23.9-37.8	25.1-38.1	24.4-36.9	25.3-38.2	25.5-37.7	26.5-39.2
Bio 6	-6.2-6.5	-5.5-7.6	-4.8-7.8	-5.2-7.9	-4.6-8.1	-5.6-7.7	-4.9-8.2	-5.0-7.9	-3.9-9.1
Bio 7	20.1-35.8	20.4-37.5	20.9-37.8	20.7-38.6	21.0-38.3	20.7-38.1	21.4-38.8	21.5-38.8	21.5-38.7
Bio 8	6.6-26.0	8.0-28.0	8.4-28.5	8.1-28.5	8.7-29.3	7.8-28.2	8.6-28.9	8.4-29.2	9.4-30.2
Bio 9	6.6-18.6	9.0-19.7	8.8-19.6	6.4-19.4	9.2-20.2	8.2-19.0	9.2-20.2	9.7-21.4	10.3-21.3
Bio 10	13.3-26.7	15.4-28.8	16.0-29.5	15.6-29.2	16.6-30.2	15.7-29.0	16.6-29.9	16.9-30.0	17.9-31.1
Bio 11	2.8-15.6	4.3-17.1	4.8-17.4	4.5-17.3	5.2-17.8	4.1-17.1	5.1-17.7	4.7-17.6	6.1-18.7
Bio 12	191-1253	169-1212	182-1253	151-1240	163-1261	165-1214	146-1257	167-1188	142-1193
Bio 13	28-313	28-272	37-278	22-295	28-285	26-283	25-278	27-277	27-258
Bio 14	0-22	0-21	0-19	0-21	0-21	0-20	0-18	0-17	0-15

Bio 15	43-119	51-135	54-130	49-13	53-130	56-133	55-139	55-137	58-137
Bio 16	78-797	67-762	67-788	55-819	64-281	64-779	54-809	66-793	55-762
Bio 17	6-80	5-73	5-67	4-70	5-72	5-71	5-63	4-64	4-54
Bio 18	50-583	50-599	66-593	52-577	52-621	49-596	50-574	44-616	50-598
Bio 19	17-227	18-198	17-188	14-159	16-179	16-176	14-150	17-197	14-150

Cuadro 7. Perfil bioclimático *Dendroctonus* spp en los diferentes escenarios del modelo MIROC5.

variable	Actual	Escenario 2050				Escenario 2070			
		rcp 2.6	rcp 4.5	rcp 6.0	rcp 8.5	rcp 2.6	rcp 4.5	rcp 6.0	rcp 8.5
Bio 1	7.0-24.7	8.6-26.1	8.9-26.4	8.7-26.1	9.4-26.8	8.7-26.2	9.2-26.7	9.3-26.7	10.3-27.7
Bio 2	10.1-18.9	10.2-19.4	10.4-19.8	10.3-20.3	10.3-19.9	10.2-19.7	10.3-20.2	10.3-20.0	10.4-20.5
Bio 3	44-80	45-80	46-79	45-80	45-78	45-79	45-78	45-78	45-77
Bio 4	50.5-63.10	53.5-64.02	56.0-63.55	52.7-66.44	62.3-64.96	60.8-64.84	64.2-65.25	63.3-64.59	71.5-65.73
Bio 5	16.2-34.3	17.7-36.4	18.4-37.3	18.1-38.1	18.9-38.2	18.0-37.1	19.4-38.3	19.0-37.9	20.2-39.2
Bio 6	-56-158	-4.5-17.0	-3.8-17.3	-42-171	-3.5-17.6	-4.6-17.1	-3.9-17.5	-3.9-17.4	-2.8-18.4
Bio 7	13.9-35.1	13.9-36.7	14.2-36.9	14.0-37.9	14.3-37.6	14.1-37.4	14.4-38.0	14.2-37.7	14.4-37.9
Bio 8	3.2-24.8	4.5-26.4	5.0-26.6	4.7-26.3	5.2-27.0	5.2-26.4	5.2-26.8	5.0-27.0	5.9-28.0
Bio 9	5.6-25.0	7.2-25.7	7.4-26.1	7.3-25.8	7.8-26.4	7.2-25.8	7.9-27.1	7.7-26.3	8.7-26.9

Bio 10	8.2-26.3	9.8-27.6	10.3-28.0	9.9-27.7	10.8-28.4	10.0-27.8	10.7-28.3	10.9-28.5	11.9-29.3
Bio 11	3.2-23.3	4.5-24.5	5.0-24.9	4.7-24.7	5.2-25.1	9.4-24.6	5.2-2.51	5.0-25.0	5.9-25.9
Bio 12	323-219	280-2650	301-2665	250-2680	271-2762	277-2681	243-2726	285-2752	230-2754
Bio 13	55-536	44-583	54-620	35-623	38-588	40-579	39-636	53-590	37-642
Bio 14	1-61	1-57	1-50	1-55	1-53	1-54	1-57	1-53	1-52
Bio 15	48-118	57-124	58-122	51-122	54-126	56-123	55-130	59-120	57-124
Bio 16	135-1443	113-1445	115-1509	94-1555	107-1535	108-1487	90-1496	116-1585	90-1521
Bio 17	9-209	7-218	7-215	8-864	7-207	7-209	6-217	6-189	6-206
Bio 18	74-885	73-956	96-949	77-1051	76-902	73-862	67-922	67-912	74-860
Bio 19	18-372	20-440	17-396	17-425	18-431	19-421	18-542	17-451	15-397

Cuadro 8. Perfil bioclimático de *Pinus cembroides* en diferentes escenarios del modelo HadGEM2-CC.

Variable	Escenario 2050		Escenario 2070	
	rcp 4.5	rcp8.5	rcp 4.5	rcp 85.70
Bio 1	12.8-23.2	13.5-23.4	13.2-23.4	15.3-25.1
Bio 2	13.0-20.3	12.8-20.1	13.2-20.5	13.2-20.4
Bio 3	47-69	45-70	45-70	41-70
Bio 4	17.00-70.13	17.96-70.22	16.82-70.35	18.34-71.44
Bio 5	23.8-37.3	24.7-36.9	24.3-37.0	26.4-39.5
Bio 6	-4.5-7.9	-4.6-8.1	-2.9-9.0	-2.9-9.4
Bio 7	21.1-37.0	21.0-36.7	21.1-37.1	21.3-37.8
Bio 8	8.8-28.2	9.3-28.7	8.9-28.7	10.9-30.4
Bio 9	8.9-21.5	9.8-20.2	9.5-20.0	11.3-24.3
Bio 10	15.7-29.2	16.1-29.3	15.9-29.4	17.8-31.3
Bio 11	5.2-18.0	5.8-18.2	5.4-18.3	7.5-19.7
Bio 12	185-1160	193-1199	199-1226	178-11711
Bio 13	37-290	31-291	37-283	28-278
Bio 14	0-22	0-20	0-21	0-23
Bio 15	52-129	55-131	57-139	59-132
Bio 16	90-755	81-762	84-792	79-752
Bio 17	5-86	6-81	6-81	-6-84
Bio 18	48-522	56-551	67-571	56-486
Bio 19	18-243	16-201	15-194	14-220

Cuadro 9. Perfil bioclimático de *Dendroctonus* spp en diferentes escenarios del modelo HadGEM2-CC.

Variable	Escenario 2050		Escenario 2070	
	rcp 4.5	rcp8.5	rcp 4.5	rcp 8.5
Bio 1	9.3-26.9	9.7-27.3	9.7-27.2	11.2-28.7
Bio 2	10.3-19.8	10.3-19.5	10.2-19.9	10.5-19.9
Bio 3	47-80	46-79	46-77	47-81
Bio 4	54.8-62.55	63.8-63.15	59.3-63.79	70.8-64.22
Bio 5	19.6-36.8	19.6-37.1	19.7-37.3	21.3-39.2
Bio 6	-4.0-17.4	-3.8-18.0	-4.1-17.7	-2.2-19.1
Bio 7	14.0-35.9	13.9-35.8	14.4-36.2	13.8-36.7
Bio 8	5.4-26.9	6.9-27.5	6.6-27.3	7.3-29.1
Bio 9	8.0-26.4	9.2-26.8	8.3-27.6	10.6-28.0
Bio 10	10.7-28.5	11.2-28.8	11.1-28.8	12.7-30.3
Bio 11	5.2-25.4	5.9-25.9	5.7-25.7	7.3-27.3
Bio 12	313-2488	323-2406	323-2455	299-2305
Bio 13	53-535	49-596	50-589	51-542
Bio 14	1-55	1-48	1-43	1-51
Bio 15	62-117	60-119	61-121	61-118
Bio 16	152-1289	135-1305	139-1337	136-1331
Bio 17	5-182	5-204	5-173	6-184
Bio 18	64-831	67-828	73-834	65-1028
Bio 19	11-269	14-8323	13-3155	18-362

5. CONCLUSIONES

La superficie de la distribución potencial actual de *Pinus cembroides* es de 194,923.88 km² la cual se verá reducida ante los efectos del cambio climático. El modelo HadGEM2-CC es más conservador en comparación a MIROC5 donde la superficie de *Pinus cembroides* libre de la presencia de descortezadores puede llegar a reducirse hasta 98 % (3,075.78 km²) respecto a la superficie actual en un rcp 8.5 para el 2070 mientras que en el modelo climático HadGEM2-CC predice se reduciría a 76 % (46,568.61 km²) en el mismo escenario. Ambos modelos predicen una reducción en la distribución de *Pinus cembroides* y aumento la su superficie de *Dendroctonus* spp. Las variables que determinan la distribución de *Pinus cembroides* son: Temperatura promedio anual, temperatura promedio del trimestre más seco y temperatura promedio del trimestre más cálido, las cuales aumentarán hasta 5.8°C en un rcp 8.5 para el año 2070. Conocer la distribución potencial de *Pinus cembroides* libres de *Dendroctonus* spp nos ayudara tomar acciones de manejo y prevención para monitorear aquellas áreas susceptibles al ataque de esta plaga y ampliar áreas de conservación para la distribución de esta especie.

6. LITERATURA CITADA

- Aguirre G., J. and J. Duivenvoorden F. 2010. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 81:875-882.
- Ávila C., R. R., Villavicencio G. y J. A. Ruiz C. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(24):92-109.
- Banco Mundial. 2010. Desarrollo y cambio climático, panorama general, versión preliminar, un nuevo clima para el desarrollo. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento. Washington E.U. 36 p.
- Benito de Pando B. y J. Peñas de Giles. 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus*. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. (7):100-119.
- Candel-Perez D. Lucas-Borja, M. E. y Linares, J. C. 2012. Predicciones de crecimiento en poblaciones de Pino laricio (*Pinus nigra* Arn. spp *salzmannii*) bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. 21(3):41-49.
- Castellanos B., J. F. E. O. Ruiz M., M. Gómez C. 2013. Guía metodológica para combatir plagas de descortezadores en el sur de México. Instituto nacional de investigaciones forestales agrícolas y pecuarias. 1^{ed} México D.F. pp: 43.

- Cavazos T., J. A. Salinas B. Martínez G. Colorado P. de Grau R. Prieto C., Conde, A. Quintanar J. Santana R. Romero M. E. Maya J. G. Rosario M. R. Ayala H. Carrillo O. Santisteban M. E., Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. <http://escenarios.ine.gob.mx>
- Collins M. Knutti R. Arblaster J. Dufresne J. L., Fichet T. Friedlingstein Gao X. W., J. Gutowski Jr. Johns T., Krinner G. Shongwe M. Tebaldi C. Weaver A. J. 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility,
- CONABIO. 2004. Problemática del conocimiento y conservación de la biodiversidad. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. México. pp. 53.
- CONAFOR. 2001. (Comisión Nacional Forestal) SIRE- Paquetes tecnológicos *Pinus cembroides*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf> (citado el 15 de octubre del 2017)
- CONAFOR 2012. (Comisión Nacional Forestal) Memoria Documental, programa de sanidad forestal, (En línea) Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126518/CNF-38_Sanidad_Forestal.pdf (citado el 23 de octubre del 2017).
- CONAFOR 2016. (Comisión Nacional Forestal). Alerta temprana y evaluación de riesgos para insectos Descortezadores noviembre 2016. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171065/Alerta_temprana_del_15_al_30_de_Diciembre_2016.pdf Citado el 30 de octubre del 2017.
- CONAFOR 2017. Riesgo de ataque de insectos descortezadores para 2017 Genero: *Dendroctonus*, Comisión Nacional Forestal Disponible en

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215366/Mapa_de_riesgo_genero_De_ndroctonus_2017.pdf Citado el 30 de octubre del 2017.

- Constante G., V. D., Villanueva J. P., Cerano J. O., Cornejo E. H. y M., Valencia S. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*. 34(106):17-39.
- Contreras-Medina R. Luna-Vega I., Y Rios-Muñoz C., 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxácea) en México: modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio de uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*. 83(3): 421-433.
- Cruz-Cárdenas G., L. López-Mata, J. T. Silva, N. Bernal-Santana, F. Estrada-Godoy y J. A. López-Sandoval. 2016. Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 22(2):135-148.
- Cuellar-Rodríguez G. Equihua-Martínez A., Vila-Castillo J., Estrada-Venegas E. G. Méndez-Montiel T., y Romero-Nápoles J. 2013. Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides* zucc. Atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana en ciencias forestal*. 4(17):42-49.
- Del val E. y C. Sáenz R., 2017. Insectos descortezadores (Coleoptera: curculionidae) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. *Revista especializada en ciencias Químico - Biológicas*. 20(2): 53-60.
- Duran E. Y A. Poloni. 2014. Escarabajos y descortezadores diversidad y saneamiento en bosques de Oaxaca. *COBABIO. Biodiversitas*. 117:7-12.
- FAO 2006. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación) Los bosques y el cambio climático. (En línea) Disponible en

<http://www.fao.org/newsroom/es/focus/2006/1000247/index.html>. Citado el 5 de octubre de 2017.

FAO 2010. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación). La gestión de los bosques ante el cambio climático. (En línea). Disponible en <http://www.fao.org/docrep/014/i1960s/i1960s00.pdf> Citado el 12 de noviembre de 2017.

Felicísimo A. M., J. Muñoz, R. G. Mateo y C. Villalba. 2012. Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Revista Ecosistemas*. 21:1-6.

Fernández E., A. J. Zavala, H. R. Romero, C. A C. Conde, A., y R I. Trejo, Velásquez. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. Informe, México, UNAM / INECC.

García E., A. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Kopöppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 5ª. (ed). UNAM. México D.F. pp. 90.

García-Aranda M., Cantú A. C., Estrada-Castillón E., Pando-Moreno M. y T. Moreno A. 2012. Distribución actual y potencial de *Taxus globosa* (taxaceae) en México. *J. Bot. Res. Inst. Texas*. 6(2):587-598.

Gutiérrez E. y I. Trejo., 214. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85:179-188.

Hijmans R., J. S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land áreas. *International Journal of Climatology*. 25:1964-1978.

- INECC 2014. Actualización y divulgación de los nuevos escenarios de cambio climático aplicados a México para fortalecer las capacidades nacionales. Instituto de ecología y cambio climático. México D.F. pp: 168.
- INECC 2014. Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios futuros de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México D. F. 1(26): 59 p.
- IPCC 2013. The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.UK. pp: 39.
- Locatelli B. K., Brockhaus, M., Colfer, M., Murdiyarso, C. J. P., & D Santoso, H. 2009. Ante un futuro incierto: Cómo se pueden adaptar los bosques y las comunidades al cambio climático. CIFOR. 5^a. (ed).
- Martínez M., N. E. Aguirre P., y C. Jaramillo J., P. 2016. Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*. 94(1):5-24.
- Mateo R., G. A. M. Felicísimo y Muños, J., 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*. 84:217-240.
- Morales N., 2012. Modelos de distribución de especies: software MaxEnt y sus aplicaciones en conservación. *Revista Conservación Ambiental*. 2(1):1-5.
- Ordoñez B., J. A. y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 7(1): 3-12.
- Palma O., S. Y R. Delgadillo J. 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences* 92(4): 587-597.

- Pearson R., G. 2007. Species distribution modeling for conservation educators and practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History. 50 p.
- Perosa M., F. Rojas., P. Villagra., M. F. Tongnelli., R. Carrara., y J.A. Álvarez 2014. Distribución potencial de los bosques de *Prosopis flexuosa* en la provincia biogeográfica del monte (Argentina). *Ecología Austral*.24:238-248.
- Phillips S., J. and M. Dudik., 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and comprehensive evaluation. *Ecography*. 31:161-175.
- Pliscof P. y Fuentes–Castillo T. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y espacios una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande*. 48(1): 61-79.
- Pompa G., M. y J. I. Yerena Y. 2014. Concentraciones de carbono en *P. cembroides* zucc: Fuente potencial de mitigación del calentamiento global. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 20(3):169-175.
- Programa Nacional Forestal.2014. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Disponible en http://www.snieg.mx/contenidos/espanol/normatividad/MarcoJuridico/PND_2013-2018.pdf citado el 9 de octubre del 2017
- Ramírez F., F. N, H. Mendizabal L C, J. Alba L. 2012. Potencial de Captura y Almacenamiento de CO2 en el Valle de Perote. Estudio de caso: *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis* D. K. Bailey. *Forestal veracruzana*. 14(11):17-22.
- Ramos-Dorantes D. B., J. L. Villaseñor, E. Ortiz y D. S. Gernandt.2017. Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88(1):215-223.
- Rodríguez M., L. 2013. Estimaciones objetivas sobre la evolución regional y global del cambio climático. *Revista de Geografía*. 24:133-162.

- Romero A. Luna., M. y García., E. 2013. Factores físicos que influyen en las relaciones florísticas de los piñoneros (Pinaceae) de San Luis Potosí, México. *Revista de Biología Tropical*. 2(62):795-808.
- Rzedowski J. 1978. *Vegetación de México*. Editorial Limusa, México, D.F. 432 p.
- Salinas-Moreno Y. Mendoza-Correa G., Barrios, M. A., Cisneros, R., Macias- Sámano J., Zuñiga G., 2004. Areography of the genus *Dendroctonus* (coleoptera: curculionidae: scolytinae) in Mexico. *J. Biogeogr.* 31:1163-1177.
- Salinas-Moreno Y. A. Ager., C. Vargas F., J. Hayes L., and G. Zúñiga., 2010. Determining the vulnerability of Mexican pine forests to bark beetles of the genus *Dendroctonus* Erichson (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Forest Ecology and Management*. 260:52-61.
- Sánchez-González A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*. 14(1):107-120.
- Treviño G., E. J. 2001. Estratificación de la información en el procedimiento digital de imágenes de satélite aplicado a la cartografía en los bosques de *P. cembroides*. *Investigaciones geográficas*. 44:56-63.
- Velásquez de Castro G., F. 2005. Cambio climático y protocolo de Kioto. *Ciencia y estrategias* *Revista Española Salud Pública*. 79:191-201.
- Vellers-Ruiz L y Trejo-Vázquez I. 2000. El cambio climático y la vegetación de México. México: una visión hacia el siglo XXI. *El cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. 57-66.
- Walther G., R. 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 365:2019-202.