

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Pinus hartwegii* EN
EL ESTADO DE TLAXCALA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO

**MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS
DEL AMBIENTE**

PRESENTA:

Josafath Rojas Sánchez

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

Dr. José Jiménez López
Dra. Maricela Hernández Vázquez

TUTORES:

Dr. Patricia Limón Huitrón
Dr. Tomás Morales Acoltzi



IXTACUIXTLA, TLAX., ENERO DE 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Código	505-RCE-04
Publicación	Febrero 2015
Revisión	00

ING. JOSAFATH ROJAS SANCHEZ
 CANDIDATO A MCSA
PRESENTE

En cumplimiento al artículo 52 fracción 'd' del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de titulación ha revisado el trabajo de investigación titulado: "Impacto del cambio climático en la distribución potencial de *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala", realizado bajo la dirección de la Dra. Maricela Hernández Vázquez y el Dr. José Jiménez López. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

- Dra. Patricia Limón Huitrón
- Dra. Maricela Hernández Vázquez
- Dr. José Jiménez López
- Dr. Tomas Morales Acoltzi
- Dr. Héctor Santos Luna Zendejas

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
 Ixtacuixtla, Tlax., 20 de enero de 2020.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN
 EN GENÉTICA Y AMBIENTE
 DRA. EDELMIRA SANCHEZ MATEO
 MAESTRIA EN CIENCIAS
 COORDINADORA GENERAL DEL CIGVA Y DEL POSGRADO
 EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

c.c.p. Expediente



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

Al Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA).

Al MAR. Adolfo Cuevas Sánchez, Coordinador del Centro de Investigación en Cambio Climático (CICC) por el soporte brindado durante este proyecto.

Al Dr. José Jiménez López por su enseñanza, apoyo y guía en esta investigación.

A la Dra. Maricela Hernández Vázquez y Dra. Patricia Limón Huitrón por su colaboración, asesoría y empeño para lograr terminar este trabajo.

A los docentes que abrieron sus puertas aún, sabiendo que no venía de una carrera afín a la biología o ambiente por todos los nuevos conocimientos que obtuve.

A mi esposa por todo el tiempo que hemos pasado juntos y los proyectos que hemos logrado. Desde tomar turnos para atender nuestro puesto en el mercado hasta las noches de desvelo discutiendo sobre temas de la maestría. Sin ti esto no hubiese sido posible.

DEDICATORIA

Para Luz Nikté y Tamara

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. ANTECEDENTES	6
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
IV. JUSTIFICACIÓN.....	11
V. OBJETIVOS	12
VI. HIPÓTESIS	12
VII. METODOLOGÍA.....	13
7.1. Área de estudio.....	13
7.2. Puntos de presencia	14
7.3. Parámetros bioclimáticos	15
7.1. Determinación de los parámetros bioclimáticos.....	16
7.2. Generación del modelo.....	19
7.6 Evaluación y validación del modelo.....	21
VIII. RESULTADOS.....	25
8.1. Determinación de las variables bioclimáticas	25
8.2. Generación de los modelos	35
8.2.1. Escenario base (1960-1990).....	35
8.2.2. Escenario RCP 4.5 (2050)	37
8.2.3. Escenario RCP 6.0 (2050)	40
8.2.4. Escenario RCP 8.5 (2050)	42
8.2.5. Escenario RCP 4.5 (2070)	45
8.2.6. Escenario RCP 6.0 (2070)	47
8.2.7. Escenario RCP 8.5 (2070)	50

8.3. Evaluación y validación de los modelos	54
IX. DISCUSIÓN.....	57
X. CONCLUSIONES.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Parámetros bioclimáticos de WorldClim v1.4	17
Tabla II. Matriz de confusión	22
Tabla III. Interpretación para distintos valores de AUC de la curva ROC	24
Tabla IV. Valores extremos de los parámetros bioclimáticos para los escenarios base y futuro del año 2050	52
Tabla V. Valores extremos de los parámetros bioclimáticos para los escenarios base y futuro del año 2070	52
Tabla VI. Medidas de tendencia central de la temperatura media anual y precipitación de los escenarios actual y futuros para el año 2050	53
Tabla VII. Medidas de tendencia central de la temperatura media anual y precipitación de los escenarios actual y futuros para el año 2070	53
Tabla VIII. Áreas potenciales de <i>Pinus hartwegii</i> para el escenario base y futuros para el año 2050	54
Tabla IX. Áreas potenciales de <i>Pinus hartwegii</i> para el escenario base y futuros para el año 2070	54
Tabla X. AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2050	55
Tabla XI. AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2070	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estaciones climatológicas (WorldClim, WorldClim - Global Climate Data, 2020)	4
Figura 2. Localización del área de estudio	14
Figura 3. Puntos de referencia de <i>Pinus hartwegii</i> para el estado de Tlaxcala	15
Figura 4. Diagrama que representa los datos encontrados en la matriz de confusión	22
Figura 5. Curva Característica Operativa del Receptor, ROC	24
Figura 6. Escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala con los 19 parámetros bioclimáticos.....	25
Figura 7. Correlación de los 19 parámetros bioclimáticos.....	26
Figura 8. Dendrograma de los 19 parámetros bioclimáticos	26
Figura 9. Análisis Jackknife para los 19 parámetros bioclimáticos.....	27
Figura 10. Análisis multivariable MESS para los 19 parámetros bioclimáticos con MaxEnt	28
Figura 11. Análisis MoD para los 19 parámetros bioclimáticos con MaxEnt	29
Figura 12. Análisis Novelty para los 19 parámetros bioclimáticos con ExDet	30
Figura 13. Análisis MIC para los 19 parámetros bioclimáticos con ExDet.....	31
Figura 14. Comparativa entre análisis MESS de MaxEnt y análisis Novelty de ExDet	32
Figura 15. Comparativa entre análisis MoD de MaxEnt y análisis MIC de ExDet .	32
Figura 16. Parámetro bioclimático Bio3: Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100).....	33
Figura 17. Parámetro bioclimático Bio4: Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100).....	33
Figura 18. Parámetro bioclimático Bio6: Temperatura mínima del mes más frío (°C)	34
Figura 19. Parámetro bioclimático Bio7: Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C)	34
Figura 20. Parámetro bioclimático Bio12: Precipitación anual (mm)	35
Figura 21. Escenario base para el año 1960-1990 para <i>Pinus hartwegii</i> en el estado de Tlaxcala	36
Figura 22. Mapa de isotermas del escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala	36
Figura 23. Mapa de isoyetas del escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala	37
Figura 24 RCP 4.5 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	38

Figura 25 Mapa de isotermas del escenario 4.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	39
Figura 26. Mapa de isoyetas del escenario RCP4.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	39
Figura 27 RCP 6.0 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	41
Figura 28. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	41
Figura 29. Mapa de isoyetas del escenario 6.0 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	42
Figura 30 RCP 8.5 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	43
Figura 31. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	44
Figura 32. Mapa de isoyetas del escenario 8.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala	44
Figura 33 RCP 4.5 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	46
Figura 34. Mapa de isotermas del escenario 4.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	46
Figura 35. Mapa de isoyetas del escenario 4.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	47
Figura 36 RCP 6.0 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	48
Figura 37. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	49
Figura 38. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	49
Figura 39 RCP 8.5 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)	51
Figura 40. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	51
Figura 41. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala	52
Figura 42. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) promedio de 30 réplicas	55

RESUMEN

Pinus hartwegii es una especie que se considera de gran importancia debido a que se encuentra en el límite de la vegetación arbórea, es una especie que tolera bajas temperaturas, fuertes vientos y suelos pobres; que al encontrarse en altitudes elevadas es más sensible a cambiar su distribución como consecuencia del cambio climático, por ello es de significativo conocer su distribución en años venideros.

El objetivo de este estudio es modelar la distribución potencial actual y futura de *Pinus hartwegii* bajo escenarios de cambio climático en el estado de Tlaxcala y determinar que variables climáticas influyen en su distribución mediante correlación, análisis de Jackknife y una comparativa entre el análisis MESS (*Multivariate Environmental Similarity Surface*) y MOD (*Most Dissimilar Variable*) de MaxEnt y el análisis Novelty y MIC (*Most Influential Covariate*) de ExDet para determinar la disimilitud de las variables actuales y futuras.

Se utilizaron 136 registros de presencia obtenidos del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala, 2014 y cinco de los 19 parámetros bioclimáticos disponibles en WorldClim, los cuales son Bio3 (Isotermalidad), Bio4 (Estacionalidad de la temperatura), Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío °C), Bio7 (Rango de temperatura anual °C) y Bio12 (Precipitación anual mm), con estos datos se realizaron los modelos bajo escenarios climáticos utilizando las trayectorias de concentración representativa RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para el año 2050 y 2070 para el estado de Tlaxcala mediante el algoritmo de Máxima Entropía MaxEnt.

Los modelos fueron evaluados con el valor de AUC, los cuáles fueron de 0.9 a 0.911, que representa un buen modelo. El modelo de distribución actual comprende un área de 80, 022 hectáreas para la aptitud alta y de 111, 509 hectáreas para la aptitud media. Los modelos tuvieron una reducción de área que va de un 78% para el RCP4.5 a un 88% para el RCP8.5 para el año 2050 y una reducción de un 93% para el RCP4.5 a un 96% para el RCP8.5 para el año 2070.

Palabras clave: *Pinus hartwegii*, cambio climático, MaxEnt, ExDet, distribución potencial.

ABSTRACT

Pinus hartwegii is a species that is considered of great importance because it is located on the treeline, it is a species that tolerates low temperatures, strong winds and poor soils; being at high altitudes is more sensitive to change its distribution as a result of climate change, so it is significant to know its distribution in coming years.

The objective of this study is to model the current and future potential distribution of *Pinus hartwegii* under climate change scenarios in the state of Tlaxcala and determine which climatic variables influence its distribution using correlation, Jackknife analysis and a comparison between the MESS analysis (Multivariate Environmental Similarity Surface) and MOD (Most Dissimilar Variable) of MaxEnt and the Novelty and MIC (Most Influential Covariate) analysis of ExDet to determine the dissimilarity of current and future variables.

For this, 136 presence records were obtained from the Inventario Estatal Forestal y de Suelos, 2014 and five of the 19 bioclimatic parameters available in WorldClim were used, which are Bio3 (Isothermality), Bio4 (Temperature Seasonality), Bio6 (Minimum temperature of Coldest Month °C), Bio7 (Temperature Annual Range °C) and Bio12 (Annual Precipitation mm), with these data the models were tested under climatic scenarios using the Representative Concentration Pathways RCP4.5, RCP6.0 and RCP8.5 for the years 2050 and 2070 for the state of Tlaxcala using the Maximum Entropy algorithm MaxEnt.

The models were evaluated with the statical value of AUC, which was from 0.9 to 0.911, which represents a good model. The current distribution model embrace an area of 80,022 hectares of highly suitable area and 111, 509 hectares of moderately suitable área. The models had an area reduction from 78% for the scenario RCP4.5 to 88% for the scenario RCP8.5 by 2050 and an area reduction of 93% for the scenario RCP4.5 to 96% for the scenario RCP8 .5 by 2070.

Keywords: *Pinus hartwegii*, climate change, MaxEnt, ExDet, potential distribution.

I. INTRODUCCIÓN

La idea central de la ecología vegetal es que las condiciones climatológicas ejercen un control dominante sobre la distribución de la mayoría de la vegetación. Cuando las condiciones climatológicas son adecuadas, las variaciones de la distribución a menor escala se controlan por otras características como las propiedades edáficas, topografía o actividades humanas (Woodward, 1987).

Se puede definir el clima como el estado promedio y la variabilidad de elementos como la temperatura, la precipitación, la presión atmosférica, la humedad y el viento, o combinaciones de estos elementos durante un tiempo determinado en su mayoría de 30 años (OMM, 2020).

Es por eso que el cómo y cuándo habrá un efecto climático sobre la distribución de especies debe de ser estudiado. El modelado de distribución de especies (SDM por sus siglas en inglés), relaciona el espacio, condiciones y presencia o ausencia de las especies en condiciones actuales, pasadas o futuras (Boot *et al.*, 2014). Cuando se conocen los rangos de las condiciones ambientales que definen el hiperespacio n-dimensional donde una especie puede sobrevivir se conoce como nicho ecológico (Hutchinson, 1957).

Los modelos climáticos dividen el planeta en millones de partes de una cuadrícula y luego resuelve cada una con balances de energía que siguen las leyes de la termodinámica entre cada cuadro. Los resultados pueden estimar docenas de variables climáticas, velocidad de los vientos, temperaturas, neblina. Estos modelos se prueban, simulando cambios entre datos históricos y comparando los resultados del modelo con datos reales observados. Una vez probados se pueden extrapolar hacia el futuro (NOAA, 2020).

El modelado de distribución de especies da como resultado un mapa sobre el que se indican las áreas con alta, media o nula probabilidad para la presencia de una especie en un determinado momento. Este estudio analiza el comportamiento de la especie para el año 2050. Para obtener este resultado se necesitan como entradas

los puntos de presencia actuales de la especie, los valores de las variables ambientales actuales y los valores de las mismas variables en el futuro, para que a través del algoritmo usado MaxEnt obtengamos esos resultados.

Los puntos de presencia se obtuvieron del inventario estatal forestal y de suelos del estado de Tlaxcala 2014. Los valores de las 19 variables de precipitación y temperatura actuales se obtuvieron de WorldClim que hace un compendio de datos climatológicos de varias organizaciones como la Food and Agriculture Organization (FAO), World Meteorological Organization (WMO), Global Historical Climatology Network (GHCN), y bases de datos de varios países como Australia, Nueva Zelanda, Perú, Bolivia entre otros (Hijmans, *et al.*, 2005).

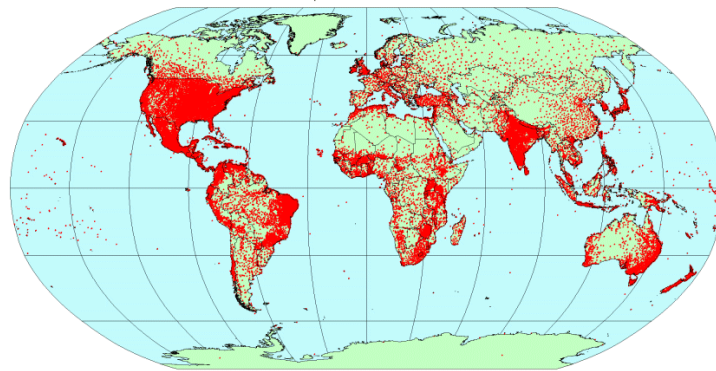


Figura 1 Estaciones climatológicas (WorldClim, WorldClim - Global Climate Data, 2020)

Para utilizar los modelos climáticos se necesitan valores de entrada de concentraciones de gases de efecto invernadero y forzamiento radiativo. El comportamiento del forzamiento radiativo está dado por modelos generados por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), los cuales predicen el forzamiento radiativo al año 2100 con 4 diferentes escenarios. Estos escenarios se llaman RCPs (Representative Concentration Pathways por sus siglas en inglés)

Los valores de las variables futuras se obtuvieron de WorldClim para los diferentes escenarios de RCP que se analizaron en este caso 4.5, 6.0 y 8.5.

Los resultados de MaxEnt para los valores futuros de las variables son la Superficie de similitud ambiental multivariable (MESS por sus siglas en inglés) y el MoD (Most dissimilar variable)

MESS fue implementado en versiones recientes de MaxEnt (3.3.2 o superior) calcula la similitud en cada punto del estudio comparado con los valores de referencia y mapea los resultados (Elith, *et al.*, 2010). Sin embargo, solo toma en cuenta la variación en el valor de una variable o característica y si sale o entra en el rango esperado para la presencia de la especie. No toma en cuenta la correlación con las otras variables.

ExDET desarrollo una nueva herramienta estadística multivariable que basada en las distancias de Mahalanobis toma en cuenta la distancia a la media y la correlación entre las variables. De esta manera además de encontrar la variable más disimilar, detecta la covarianza que más influye en esa disimilitud (Mohsen B. *et al.*, 2014)

La diferencia básica entre el análisis Most dissimilar variable MoD (MaxEnt y Most influential covariate (MIC). Es que el MoD toma en cuenta la variable más disimilar del escenario base al escenario futuro y de ahí parte para predecir o modelar la distribución de la especie. En el caso de MIC, se parte de la covariación más influyente del escenario futuro respecto al escenario base.

II. ANTECEDENTES

Manzanilla-Quiñones *et al.*, (2019) realizaron modelos de distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* en el Eje Neovolcánico Transversal para el año 2050. Utilizaron ocho variables bioclimáticas de las 19 variables bioclimáticas obtenidas por WorldClim, se incluyeron también las variables de pendiente, suelo, vegetación y altitud, se utilizaron dos forzamientos radiativos RCP4.5 y RCP8.5 con los Modelos de Circulación General (MCG) CRNMCM5 y HADGEM2_ES. Los resultados de la trayectoria 4.5 indican que la distribución actual del bosque disminuirá entre 11.7% y 18.3% para el año 2050 y la trayectoria 8.5 indica una disminución de la distribución actual de 18.3% a un 26.9% para el año 2050.

Cruz-Cárdenas *et al.*, (2015) realizaron un modelado de la distribución de 12 especies de Pinacea: *Abies guatemalensis*, *A. religiosa*, *Pinus douglasiana*, *P. hartwegii*, *P. lawsonii*, *P. leiophylla*, *P. michoacana*, *P. montezumae*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, *P. rzedowskii* y *P. teocote* bajo escenarios actuales y de cambio climático en el estado de Michoacán. Las variables que se utilizaron en el modelo son Bio5, Bio6, Bio7, Bio17, modelo digital de elevación, pH y potasio. Se modeló bajo dos escenarios de forzamiento radiativo RCP4.5 y RCP 8.5 para un horizonte cercano 2015-2039 y lejano 2075-2099. Los resultados para *Pinus hartwegii* fue una reducción de 38.27% para el escenario 2030 con respecto al escenario base y una reducción de área potencial de 75.94% para el escenario 2090.

Gutiérrez y Trejo (2014) determinaron modelos de cambio climático para cinco especies arbóreas en México: *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *Abies hickelii*, *Quercus laurina* y *Q. ocoteifolia*. Utilizaron parámetros climáticos de promedios mensuales y anuales de temperatura y precipitación; los mapas de distribución se hicieron para dos modelos de circulación general MPIECHAM5 y UKMOHADGEM1 con dos escenarios de emisiones A2 (emisiones altas de gases de efecto invernadero) y B2 (emisiones menores al escenario A2) para el año 2050. La especie más afectada en este estudio es *P. hartwegii*, ya que su reducción de área

con el modelo HADGEM1 es de 77% para el escenario B2 y de 80% para el escenario A2 para el año 2050 y con el modelo MPIECHAM5 la reducción de área es de 82% para el escenario B2 y 86% para el escenario A2 con respecto al escenario base.

Arriaga y Gómez (2007) generaron mapas de distribución potencial para 17 especies de encino y 17 especies de pino, incluyendo *Pinus hartwegii* en México. Se utilizó el modelo de circulación general HadCM2, que incluye dos escenarios HHGGA50 (escenario menos conservador) y HHGSDX50 (escenario conservador) para el año 2050. Los resultados demuestran que para el escenario HadCM2 *P. hartwegii* fue la especie de Pino que mayor reducción de área presentó con una reducción de 41.49% con respecto al escenario base.

Aguirre-Gutiérrez y Duivenvoorden (2010) estudian la distribución potencial de 56 especies del género *Pinus* en México mediante la modelación con MaxEnt con el objetivo de investigar si las especies de pino clasificadas por *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* (IUCN) como amenazadas tienen una representación adecuada en las áreas protegidas de México. Para el modelado de los mapas se utilizaron un total de ocho capas ambientales, modelo digital de elevación, pendiente, precipitación, temperatura, tipos de suelo, regímenes de humedad del suelo y cobertura vegetal utilizando el algoritmo de MaxEnt. Los resultados demuestran que la representación del área de las especies dentro de las áreas protegidas no va más allá del 70%, 39 especies muestran una representación menor al 10%, 14 especies muestran una representación entre el 10 y 20%, y sólo 3 especies representan niveles superiores al 20%. *Pinus hartwegii* tiene una extensión de 121, 706.2 Km² y su porcentaje de área protegida es del 8%.

Aceves-Rangel *et al.*, (2018) muestran la distribución potencial actual de 20 especies del género *Pinus* en México, determinaron que variables climáticas influían en su distribución y establecieron su perfil bioclimático. Para la elaboración de los modelos utilizaron 19 variables bioclimáticas, exposición, pendiente y altitud e implementaron el algoritmo de Máxima Entropía mediante el programa de MaxEnt. Las variables climáticas que más contribuyeron en general en los modelos fueron

Bio1, Bio10 y la altitud, para *P. hartwegii* fue Bio10, Bio12 y la altitud. Las tres especies que mayor superficie potencial mostraron son *P. montezumae* con 14,744.8 Km², *P. devoniana* con 14,436.1 Km² y *P. pseudostrobus* con 11,594.8 Km², mientras que *P. hartwegii* obtuvo una superficie de 4,755 Km².

Díaz-Castillo en 2019 concluyó que la distribución espacial de *P. montezumae* tiene una reducción potencial de entre 59% a 87%. Con escenario RCP 4.5 para 2050 y 8.5 para 2070 respectivamente.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio climático es una problemática actual que representa uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad, debido a que los cambios actuales se están presentando a un ritmo relativamente rápido y la causa principal de estas alteraciones en el sistema climático es debido a actividades antrópicas. Algunos efectos que se presencian es el aumento de la temperatura, alteraciones en las precipitaciones y un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, lo cual está afectando directamente a los bosques (Jori, 2009).

A pesar de que la investigación sobre los efectos del cambio climático en los bosques de México es un tema relativamente poco estudiado, se sabe que debido al cambio de temperatura causado por el cambio climático la distribución de las especies de árboles ha cambiado y que estas se desplazan hacia lugares de mayor altitud y es importante debido a que el clima podría cambiar rápidamente que la capacidad de adaptación de algunas de las especies arbóreas lo cual podría causar su extinción y las zonas a las que se desplacen podrían no ser edáficamente apropiadas para la migración (Ciesla, 1995; García-Martínez, 2013). Otra problemática es que, al migrar hacia mayores altitudes en zonas montañosas, un cambio pequeño en altitud genera un cambio significativo en latitud disminuyendo las poblaciones lo que provoca que sean más vulnerables (Peters *et al.*, 1990; García-Martínez, 2013).

Los ecosistemas que se encuentran por encima del límite arbóreo crecen en condiciones extremas como el frío, la sequía, la baja disponibilidad de nutrimentos, vientos tempestuosos, entre otros y pueden considerarse como especies frágiles como *Pinus hartwegii* y *Pinus rudis* (FAO-CONAFOR, 2011; García Martínez, 2013).

Pinus hartwegii se encuentra en el límite superior e incluso se han encontrado poblaciones encima de este límite, donde algunas de las poblaciones de esta especie en México se encuentran amenazadas por elementos naturales y antropogénicos, lo cual causa en la actualidad poblaciones reducidas, fragmentadas

y aisladas entre sí. El crecimiento de esta especie está limitado principalmente por las condiciones ambientales predominantes a altas alturas como son las bajas temperaturas y la escasa precipitación (Hernández *et al.*, 2005; Madrigal y González, 1993; García Martínez, 2013). Otras razones por las que esta especie se encuentra en peligro es por los efectos de endogamia que presenta la especie (FAO-CONAFOR, 2011); la presencia de un bajo porcentaje de germinación como consecuencia a un elevado número de semillas vanas (Tivo-Fernández, 2004).

La selección de variables en los estudios realizados siguen el mismo procedimiento y no existen estudios que comparen resultados si se utiliza MaxEnto ExDET en el proceso de selección de variables bioclimáticas.

IV. JUSTIFICACIÓN

Pinus hartwegii es una especie nativa de México, que se considera única porque es muy probable que sea la especie de pino que alcanza las más grandes alturas en los bosques en México. Ha sido de gran interés porque marca el límite altitudinal arbóreo en el país y se ha encontrado que puede crecer incluso por encima de los 4000 msnm, soporta temperaturas bajas, escasez de precipitación, fuertes vientos y pobreza del suelo. La importancia de la especie radica en que es de las pocas especies que se desarrollan en las mayores elevaciones sobre el nivel del mar (Rzedowski, 1983).

Ecológicamente proporciona servicios ecosistémicos como es la captura de dióxido de carbono, producción de oxígeno, regulación del ciclo hidrológico debido a que el producto del deshielo de los volcanes sirve como alimentador de agua a los mantos fráticos (SEMARNAT, 2014; Musálem-Santiago y Solís-Pérez, 2000)

Existe en el país 21 instancias que desarrollan plantaciones de conservación y mejoramiento genético *ex situ* con la finalidad de almacenar semillas para abastecer a los viveros que producen plantas para los programas de reforestación, *P. hartwegii* se encuentra comprendida en los programas de conservación *ex situ* en tres instancias por el Departamento de Bosques de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el Departamento de Botánica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana (FAO-CONAFOR, 2011).

Económicamente, la madera de *P. hartwegii* es dura y resinosa, es empleada para celulosa, papel, pulpa química, derivados celulósicos, material para construcción, aserrío, chapa, triplay, postes para cercas, pilotes, trozo para combustible y para carbón. (Musálem-Santiago y Solís-Pérez, 2000, García Martínez, 2013)

V. OBJETIVOS

Objetivo general

- Modelar la distribución potencial actual y futura de *Pinus hartwegii* mediante escenarios de cambio climático en el estado de Tlaxcala.
- Implementar la herramienta ExDet tool para la selección de los parámetros bioclimáticos.

Objetivos específicos

- Establecer las variables ambientales que influyen en la distribución potencial de *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala.
- Modelar la distribución de *Pinus hartwegii* bajo tres escenarios de cambio climático RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 en el estado de Tlaxcala.

VI. HIPÓTESIS

- Existe una relación directa entre el efecto del cambio climático y el área de distribución potencial de *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala.

VII. METODOLOGÍA

7.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el estado de Tlaxcala en la zona central de la República Mexicana, el cual presenta límites territoriales en su mayor parte con el estado de Puebla al norte, este y sur, al oeste con el Estado de México y al noroeste con el estado de Hidalgo. El estado se encuentra entre las coordenadas geográficas 19° 06' 18.33" a 19° 43' 44.04" latitud norte y 98° 42' 30.24" a 97° 37' 31.44" longitud oeste (INEGI, 2017). Se encuentra situado a un rango altitudinal de 2, 200 a 4420 msnm y su extensión territorial es de 4016 Km², que corresponde al 0.2% de extensión territorial con respecto al total nacional, es de las tres entidades más pequeñas del país (INEGI, 2017). La mayor parte de la entidad presenta clima templado subhúmedo correspondiente al 99.2% del estado, el 0.6% presenta clima seco y semiseco, el restante 0.2% presenta clima frío. La temperatura media anual es de 14°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 25°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 1.5°C en el mes de enero; y una precipitación anual es de 800mm, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a septiembre (INEGI, 2017).

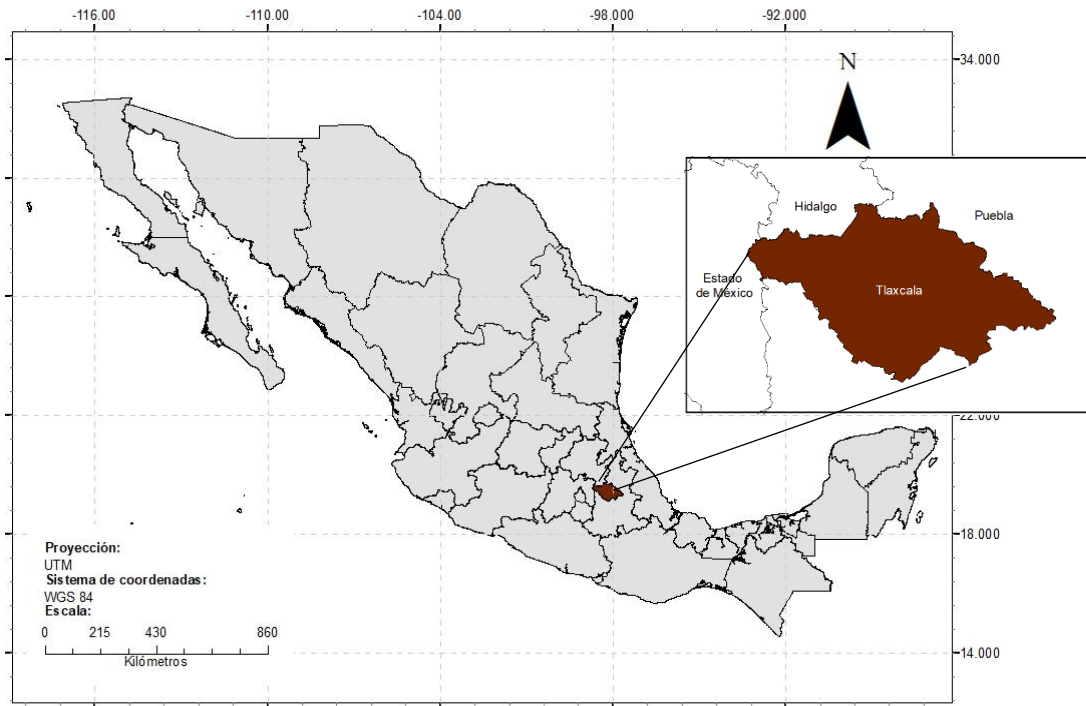


Figura 2. Localización del área de estudio

7.2. Puntos de presencia

Se utilizaron 136 puntos de presencia obtenidos de los registros del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala de 2014. En la Figura 3 se observa el mapa de ocurrencia para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala.

El formato de entrada de coordenadas geográficas reconocido por MaxEnt es en CSV (comma-separated value), donde se debe indicar el nombre de la especie, seguido de la coordenada X (longitud) y la coordenada Y (latitud):

Especie, X, Y

P. hartwegii, -98.27383333, 19.71605556

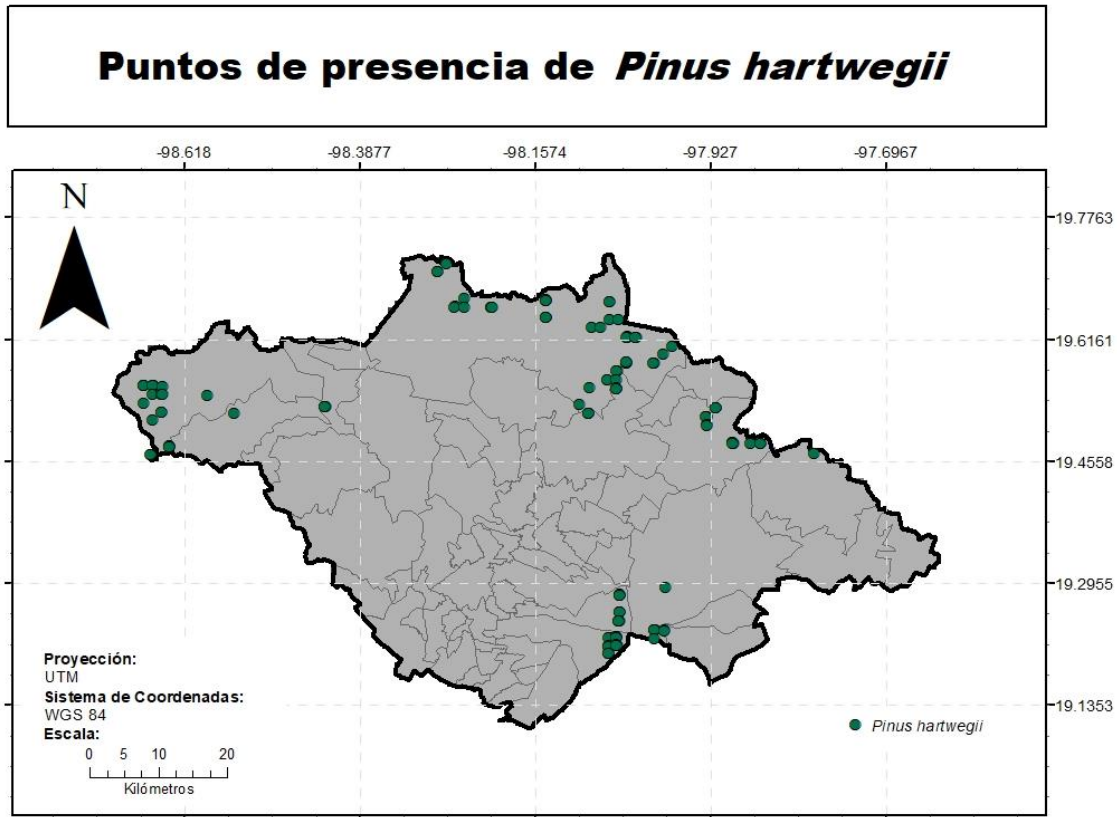


Figura 3. Puntos de referencia de *Pinus hartwegii* para el estado de Tlaxcala

7.3. Parámetros bioclimáticos

Se utilizó los parámetros bioclimáticos obtenidos de la base de datos de WorldClim v1.4 para el escenario base con un periodo climático de 1960-1990, los escenarios futuros RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para el periodo climático 2041-2060 (2050) y el periodo 2061-2080 (2070).

Los parámetros bioclimáticos de WorldClim para el escenario base se deriva la climatología mensual de precipitación, temperatura promedio, temperatura mínima y máxima de un conjunto de datos climáticos a nivel mundial. La temperatura está dada en °C x 10 y la precipitación en mm (WorldClim, 2016).

Las variables bioclimáticas para los escenarios futuros son generadas a partir de información sobre cambio climático proveniente de modelos de circulación global (AOGCMs atmosphere-ocean coupled general circulation models), modelos físicos sobre dinámica climática y su capa para el presente para distintas trayectorias de concentración representativa. El modelo de circulación que se utilizó en este proyecto fue el modelo CCSM4 para las trayectorias representativas RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5.

WorldClim contiene 19 parámetros bioclimáticos, en distintas resoluciones espaciales y en diferentes formatos raster. Para este trabajo inicialmente se utilizaron las variables ambientales a una resolución espacial de 0.86 km² y el formato ASCII de ESRI debido a que es el formato de entrada aceptado por MaxEnt (Varela *et al.*, 2015). En la Tabla 1 se puede observar cada una de las variables, así como su respectiva descripción.

7.1. Determinación de los parámetros bioclimáticos

Para seleccionar los parámetros bioclimáticos a utilizar se realizaron los siguientes análisis: Correlación de las variables con el programa de R Studio v1.2.5001; análisis de Jackknife, MESS y MoD con el programa de MaxEnt v3.4.1 y finalmente análisis de Novelty y MIC con el programa de ExDet v1.1.

La prueba de Jackknife sirve para estimar cuáles son las variables más importantes en el modelo, a partir de excluir una variable y crear un modelo con las remanentes, así como crear un modelo con esa variable de manera aislada. Esta operación se realiza con cada una de las variables (Phillips, 2015).

El cálculo del análisis multivariado MESS (Multivariate Environmental Similarity Surface) representa cuán similar es un punto a un conjunto de puntos de referencia, con respecto a un conjunto de variables predictoras (Bio1, Bio2, Bio3, ...). Los valores en el MESS están influenciados por la distribución completa de los puntos de referencia, de modo que los sitios dentro del rango ambiental de los puntos de

referencia, pero en entornos relativamente inusuales tendrán un valor menor que los de entornos muy comunes (Elith, Kearney y Phillips, 2010).

Tabla I. Parámetros bioclimáticos de WorldClim v1.4

Variable	Descripción
Bio1	Temperatura media anual (°C)
Bio2	Rango de temperatura media diaria (°C)
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100)
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C)
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
Bio7	Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C)
Bio8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso (°C)
Bio9	Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
Bio10	Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
Bio11	Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
Bio12	Precipitación anual (mm)
Bio13	Precipitación del mes más lluvioso (mm)
Bio14	Precipitación del mes más seco (mm)
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, %)
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)
Bio17	Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Bio19	Precipitación del trimestre más frío (mm)

El análisis MESS de MaxEnt ayuda a revelar si existe un posible nuevo hábitat por el modelo (extrapolación), que informa la credibilidad de la producción del modelo. Si dejamos que \min_i sea el valor mínimo de la variable V_i sobre el conjunto de puntos de referencia y lo mismo para \max_i , p_i será el valor de la variable v_i en el punto P , f_i será el porcentaje de puntos de referencia cuyo valor de la variable V_i es menor que p_i , entonces la similitud de P con respecto a la variable V_i se calcula mediante: (Li, Du, y Guo, 2015)

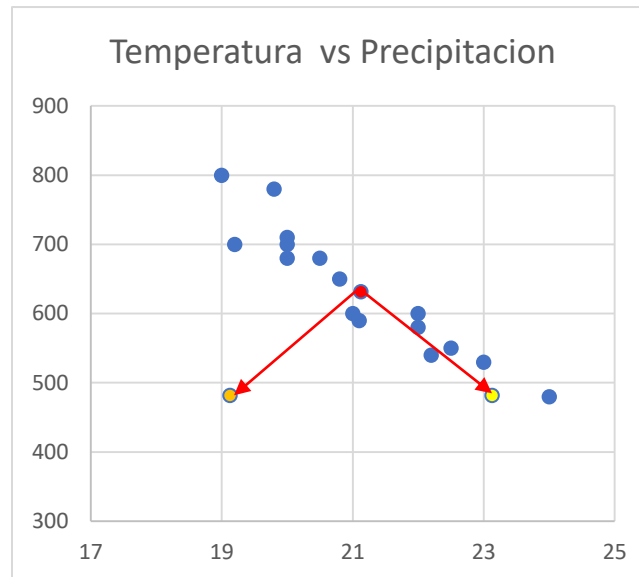
$$\begin{array}{ll} (p_i - \min_i) / (\max_i - \min_i) & \text{if } f_i = 0 \\ 2 \times f_i & \text{if } 0 < f_i < 50 \\ 2 \times (100 - f_i) & \text{if } 50 < f_i < 100 \\ (\max_i - p_i) / (\max_i - \min_i) \times 100 & \text{if } f_i = 100 \end{array}$$

Finalmente, la similitud multivariada de P es el mínimo de su similitud con respecto a cada variable. El MESS es similar a un análisis BIOCLIM [35] que utiliza percentiles, pero se extiende para dar valores negativos para diferenciar los niveles de disimilitud cuando está fuera del rango de los puntos de referencia, donde la confiabilidad del resultado del modelo depende de precisión de las curvas de respuesta de especies. Los resultados de MESS permiten el mapeo de ubicaciones donde los factores limitantes son importantes. La suposición es que la información sobre qué variable está impulsando el valor MESS en cualquier punto dado puede extraerse y mapearse al encontrar la variable más diferente. La variable más diferente MoD para un punto P es la variable con el menor valor de similitud con P . Según el mapa de factores limitantes, podríamos deducir fácilmente qué factores limitan los procesos fisiológicos y ecológicos (Li, Du y Guo, 2015).

El análisis Novelty Tipo 1 que ofrece la herramienta de ExDet identifica un nuevo hábitat a partir de puntos que son nuevos porque están fuera del rango de las covariables individuales.

En análisis Novelty toma en cuenta la covariación entre variables para evaluar la similitud o disimilitud de un punto. Al tomar en cuenta la covariación entre variables se obtienen resultados más precisos.

Para dar un ejemplo en un espacio de dos dimensiones, temperatura y precipitación.



En este caso, si utilizáramos MESS de MaxENT la similitud disimilitud de ambos puntos es la misma. Sin embargo, al tomar en cuenta la covariación entre ambas variables el punto amarillo es similar a la distribución y el anaranjado sería el más disimilar.

La herramienta Novelty de ExDET con el valor de covariables en uno daría el mismo resultado que el MESS de MaxENT

7.2. Generación del modelo

Para determinar la distribución de especies se utilizó el software MaxEnt que está basado en el algoritmo de máxima entropía, este algoritmo de aprendizaje combina estadística, máxima entropía y métodos bayesianos, cuyo propósito es estimar

distribuciones de probabilidad de máxima entropía sujeto a restricciones dadas por la información ambiental. Modela todo lo que es conocido y no supone nada sobre lo desconocido, al no suponer nada sobre lo desconocido permite escoger la distribución más “uniforme” (Candelario-Mejía *et al.*, 2015).

MaxEnt expresa la idoneidad de una celda de cuadrícula en función de las capas ambientales o climáticas en esa celda de cuadrícula en un paisaje, junto con un conjunto de ubicaciones de muestra donde se han observado las especies de plantas. Se demuestra que la distribución de idoneidad es la misma que la distribución de Gibbs que maximiza el producto de las probabilidades de las ubicaciones de muestra, donde la distribución de Gibbs toma la forma:

$$P(X)=\exp(c_1 \times f_1(X) + c_2 \times f_2(X) + c_3 \times f_3(X) \dots) / Z$$

Aquí c_1 , c_2 , c_3 , ... son constantes, f_1 , f_2 , f_3 , ... son las características, y Z es una constante de escala que asegura que P sume a 1 en todas las celdas de la cuadrícula (Li, Du y Guo, 2015).

Para la ejecución del modelo utilizando el algoritmo de MaxEnt se importaron los puntos de presencia de *Pinus hartwegii* obtenidos del Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Tlaxcala 2014 en la ventana de Samples (muestras), después se procedió a importar las capas climáticas en este caso los parámetros bioclimáticos que fueron obtenidas de Worldclim v1.4 en la opción Environmental layers (capas ambientales).

Las características utilizadas fueron lineal, cuadrático y producto en la sección de Features (características), el formato de salida fue acumulativo y el tipo de salida fue ascii. En la sección de settings (ajustes) en el apartado Random test percentage (porcentaje de muestra aleatoria) se seleccionó 40, lo cual indica que debe seleccionar de manera aleatoria el 40% de los registros de muestras para usarlos como registros de validación y el 60% los utiliza como registros de entrenamiento. En el apartado de Replicates (repeticiones) se utilizó 30 y en Replicated run type (Tipo de réplica) se eligió Bootstrap, lo cual indica que el procedimiento antes mencionado se realizó 30 veces mediante la técnica de Bootstrap, es un método de

remuestreo para estimar o aproximar una distribución muestral de un estadístico, basado en los principios de sustitución y aproximación numérica (Miguel-Álvarez, Ángel y Pilar-Olave, 2002).

Los modelos finales se transformaron a mapas de tres clases: aptitud alta, media y baja; con el programa de Arcmap v10.5 utilizando como umbral de corte para la aptitud alta el percentil 10 de los datos de entrenamiento acumulativo y como umbral de corte para la aptitud media el umbral mínimo de los registros de presencia de entrenamiento. Finalmente, se realizó el cálculo de las áreas de aptitud alta, media y baja en hectáreas con el programa Arcmap v10.5.

7.6 Evaluación y validación del modelo

Para evaluar un modelo de distribución de especies, su fiabilidad se fundamenta en la evaluación del error. Hay dos tipos de error, el error de omisión y el error de comisión.

El error de omisión: predice la “no-presencia” de la especie donde realmente está; entendiéndose como Falso Negativo. Pudiendo no predecir los lugares de presencia que pueden ser de importancia para la supervivencia de la población (Correia, 2018).

Error de comisión: predice la “presencia” de la especie donde no está, entendiéndose como Falso Positivo. Puede ser real o aparente, ya que un “falso positivo” puede significar una “sobre-predicción” del modelo o una predicción de nicho potencial de la especie (Correia, 2018).

En la Tabla II se puede observar la cuantificación del componente de error con una matriz de confusión y en la Figura 4 se puede observar el diagrama que describe la matriz, se puede visualizar la región ocupada en la realidad (área verdadera) en color azul, y la predicción (área estimada) en color amarillo. Los puntos de prueba, puntos independientes usados para verificar el modelo, pueden presentarse en cuatro áreas. Las estrellas están bien clasificadas, así los puntos que están en el

área **a** están clasificados correctamente como puntos de presencia y puntos que se encuentran en el área **d** están clasificadas correctamente como puntos de ausencia. Mientras que los círculos están mal clasificados, los puntos que están en el área **b** son errores de comisión y los puntos que se encuentran en el área **c** son errores de omisión (CONABIO, 2008).

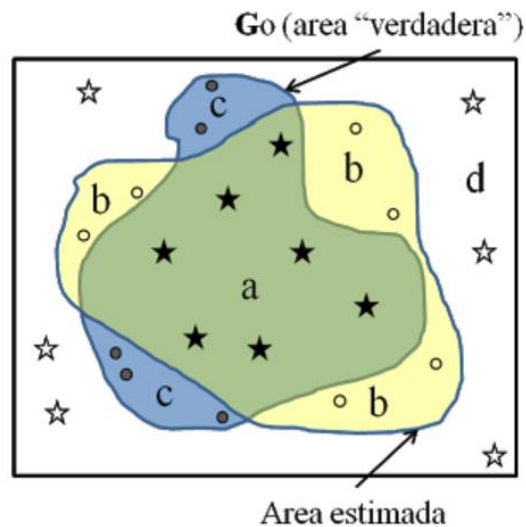


Figura 4. Diagrama que representa los datos encontrados en la matriz de confusión

Tabla II. Matriz de confusión

		Datos reales (registros de presencia y ausencia)	
		Presencia	Ausencia
Datos simulados (modelos de distribución)	Presencia	a	B
	Ausencia	c	D

*A: presencias acertadas (verdaderos positivos), B: ausencias fallidas (falsos positivos o error de comisión), C: presencias fallidas (falsos negativos o error de omisión), D: ausencias acertadas (verdaderos negativos).

Una de las herramientas para validar los modelos de distribución de especies es el *Receiver Operating Characteristic* (Característica operativa del receptor, ROC) que es una representación gráfica de la sensibilidad frente a (1-especificidad) según se varía el umbral de clasificación. La sensibilidad es la proporción de verdaderos positivos, $S = a/(a+c)$ y (1-Especificidad) representa la proporción de falsos positivos, $E = b/(b+d)$. Gráficamente es la representación de la razón de verdaderos positivos frente a la razón de falsos positivos en diferentes umbrales de clasificación (Candelario-Mejía *et al.*, 2015; Muñoz-Reja, 2018).

La curva ROC da origen al estadístico *Area Under the Curve* (Área bajo la curva), por lo mide toda el área bidimensional por debajo de la curva ROC completa, la forma de interpretarlo corresponde a la probabilidad de que, tomado al azar un par de puntos, uno presencia y otra ausencia, el modelo adjudique a la presencia un valor mayor de idoneidad o probabilidad que a la ausencia, y esto para todos los posibles pares en la muestra. El valor de AUC está comprendido entre 0 y 1; un valor de 1 indica que todos los casos se han clasificado correctamente y uno de 0.5 que el modelo no es diferente de clasificar los casos al azar; valores menor a 0.5 indican que el modelo es realmente malo, ya que clasifica erróneamente más casos al azar, un valor de 0 indica que todos los casos han sido clasificados erróneamente (Candelario-Mejía *et al.*, 2015; Muñoz-Reja, 2018).

En MaxEnt al haber sólo puntos de presencia, los puntos de ausencia son reemplazados por puntos del área de fondo (background) generados aleatoriamente, para la elaboración de los estadísticos ROC y AUC. En la Figura 5 se puede observar el gráfico de ROC y su respectivo AUC y en la Tabla III se puede observar la interpretación de Araújo *et al.*, (2005) para los valores de AUC en los modelos generados.

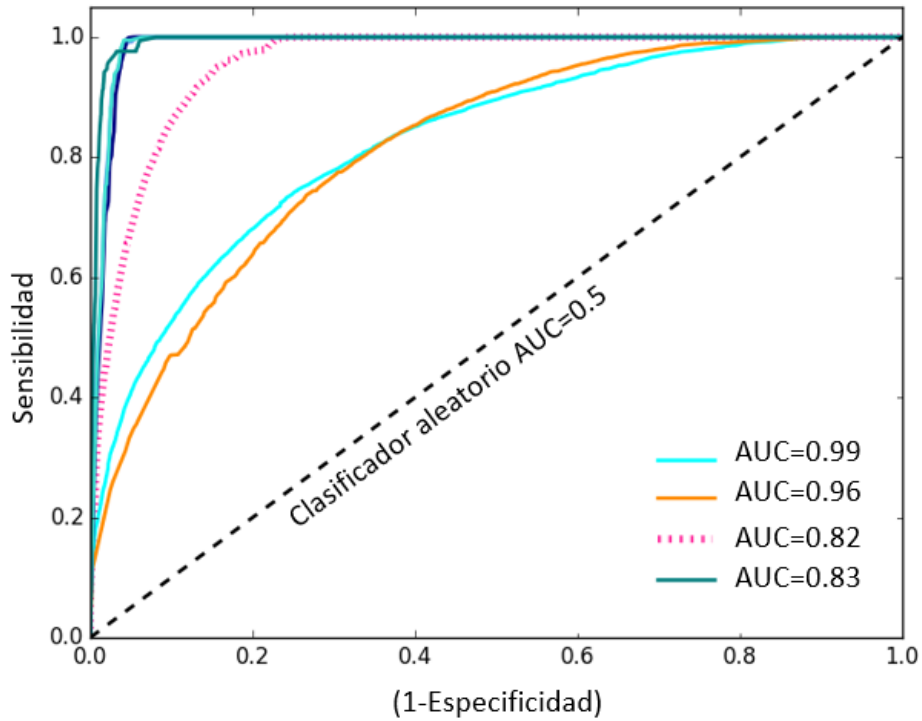


Figura 5. Curva Característica Operativa del Receptor, ROC

Tabla III. Interpretación para distintos valores de AUC de la curva ROC

Interpretación	AUC
Excelente	$AUC > 0.90$
Buena	$0.80 > AUC > 0.90$
Aceptable	$0.70 > AUC > 0.80$
Mala	$0.60 > AUC > 0.70$
No válida	$0.50 > AUC > 0.60$

*AUC: Área Bajo la Curva

VIII. RESULTADOS

8.1. Determinación de las variables bioclimáticas

Se realizó una corrida en MaxEnt para obtener la distribución potencial para *Pinus hartwegii* utilizando los 19 parámetros bioclimáticos de WorldClim de precipitación y temperatura, el cual se puede observar en la Figura 6.

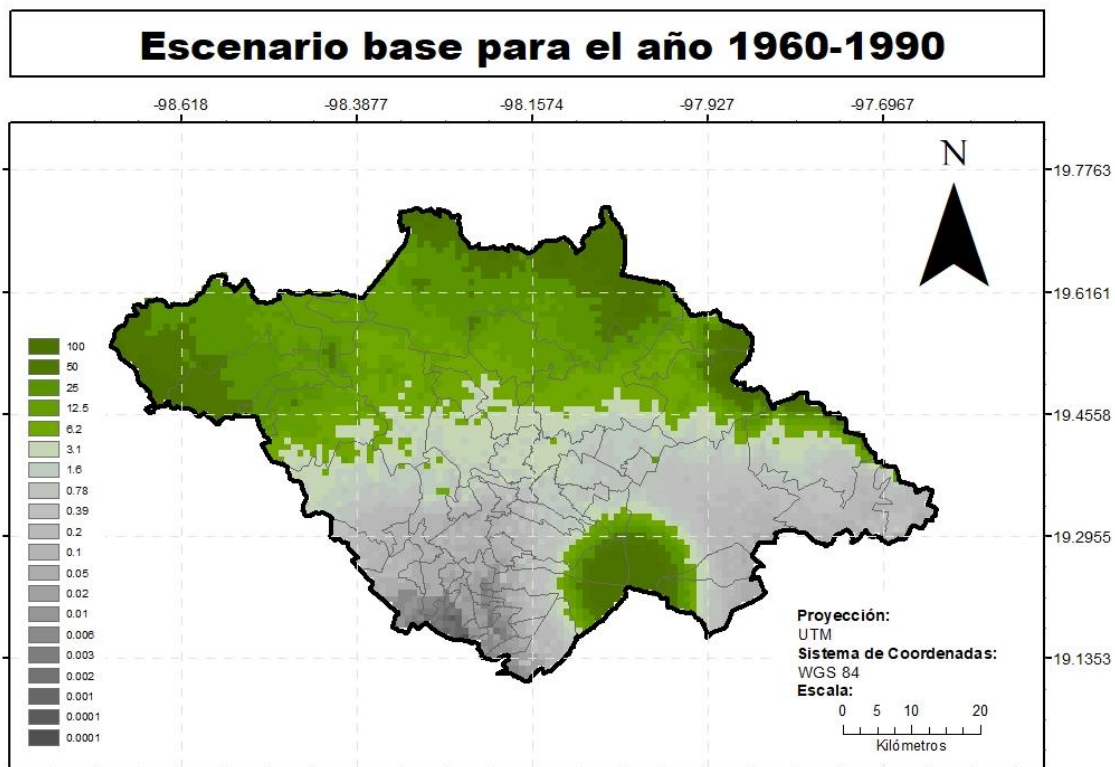


Figura 6. Escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala con los 19 parámetros bioclimáticos

Para determinar las variables a utilizar en los modelos actual y futuros se realizó un análisis de correlación y se presentó en forma de dendograma realizados con RStudio; un análisis de Jackknife, MESS y MoD proporcionados por el programa de MaxEnt; y una correlación, un análisis Novelty y MIC por el programa de ExDet.

La correlación de las 19 variables ambientales se puede observar en la Figura 7 y la representación de esta correlación en un dendrograma en la Figura 8.

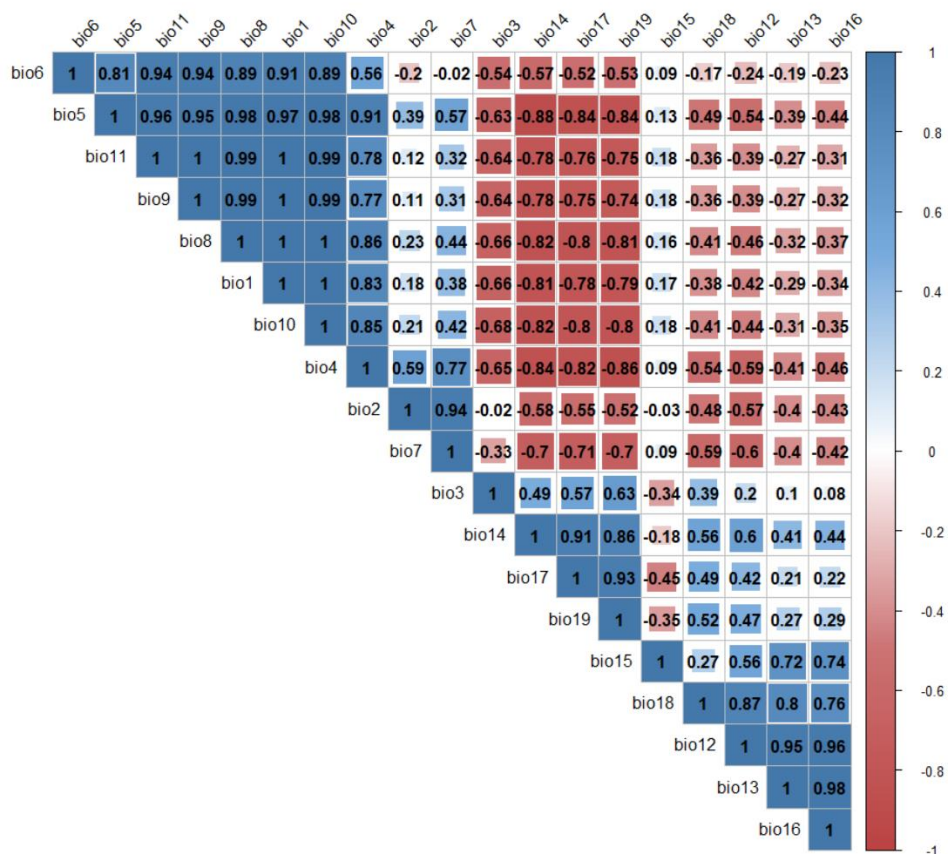


Figura 7. Correlación de los 19 parámetros bioclimáticos

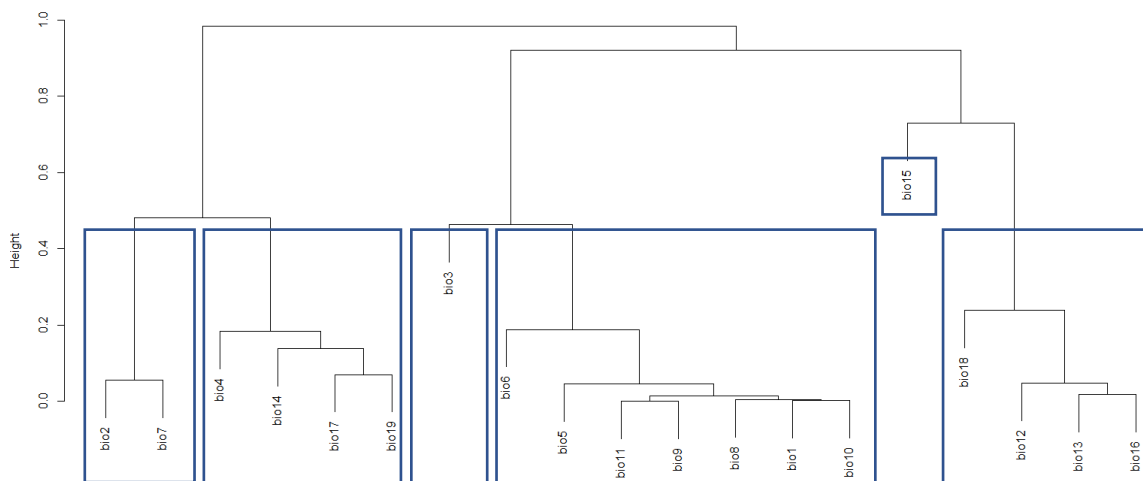


Figura 8. Dendrograma de los 19 parámetros bioclimáticos

El análisis de Jackknife se presenta en la Figura 9. Donde se puede observar la importancia de cada variable en el modelo. La variable con menor importancia es BIO 13 y la de mayor importancia es BIO9

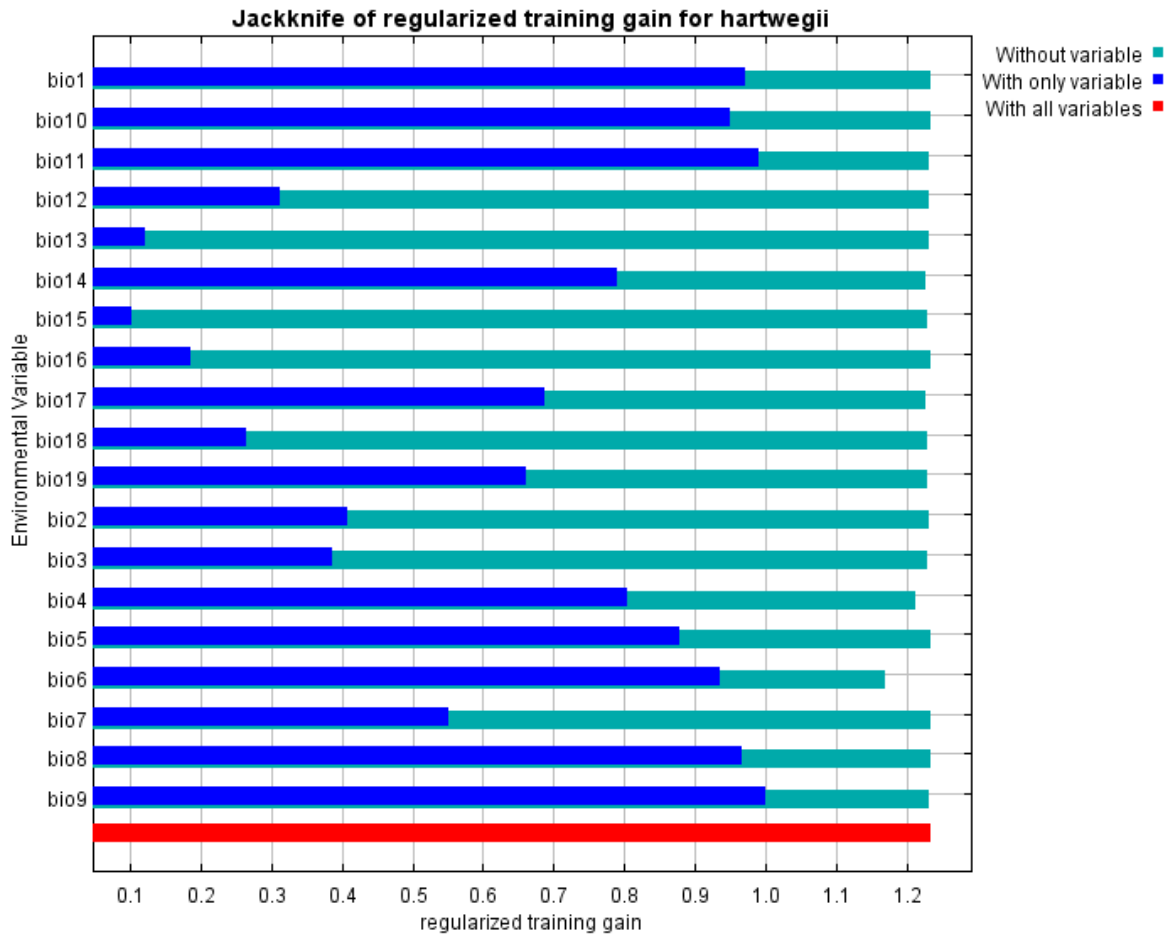


Figura 9. Análisis Jackknife para los 19 parámetros bioclimáticos

En la Figura 10 se presenta el análisis *Multivariate Environmental Similarity Surface* (Análisis multivariado, MESS) realizado con el programa de MaxEnt. En él se presentan las áreas en rojo que tienen uno o más parámetros bioclimáticos futuros fuera del rango presente en los parámetros bioclimáticos actuales, por lo que las predicciones hechas en esas áreas deben ser tratadas con cuidado. Las áreas azules presentan los lugares donde los parámetros bioclimáticos futuros están dentro del rango de los parámetros bioclimáticos actuales.

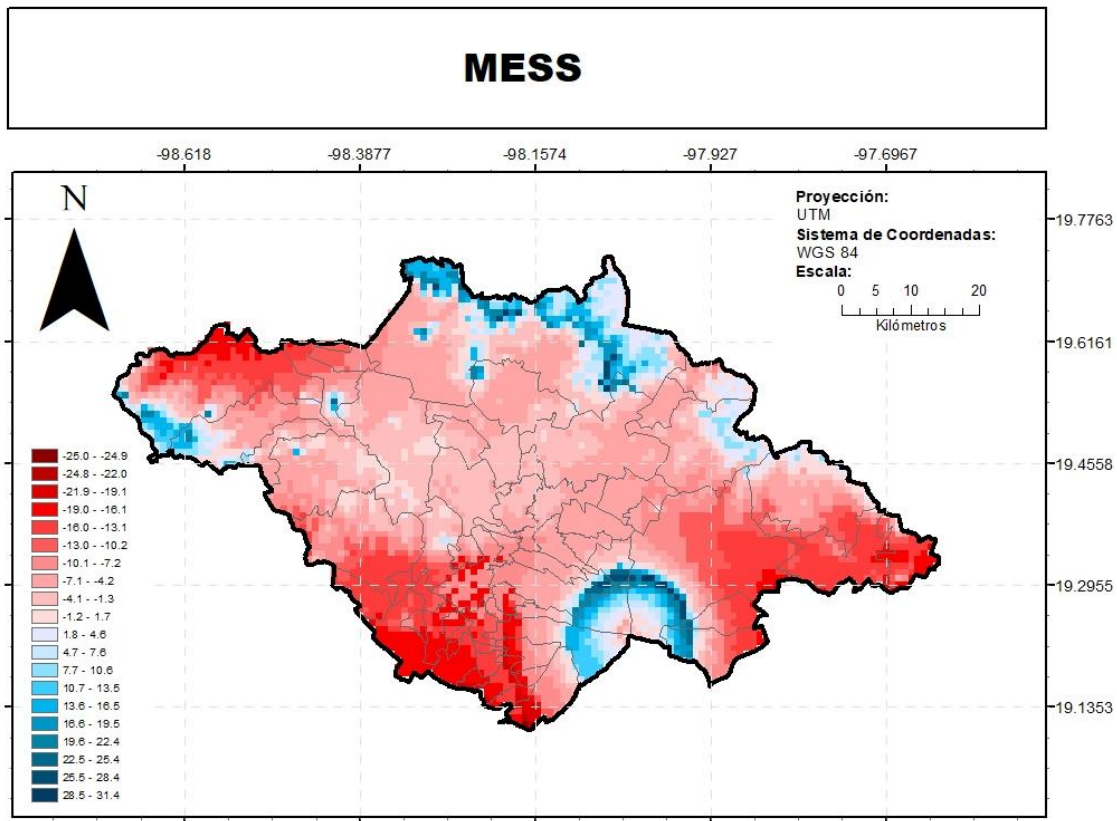


Figura 10. Análisis multivariable MESS para los 19 parámetros bioclimáticos con MaxEnt

Se presenta el mapa *Most Dissimilar Variable* (Mapa con la variable más disimilar, MoD) realizado con el programa de MaxEnt en la Figura 11 mostrando la variable del escenario futuro que más fuera esta del rango de las variables actuales por área. **Bio1** abarca una proporción muy baja del municipio de Tlaxcala; **Bio2** abarca áreas de los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa de Mariano Arista, Sanctórum de Lázaro Cárdenas, Españita, Benito Juárez y un área muy baja de Tlaxco; **Bio3** está

presente en pequeñas áreas de los municipio de Zacatelco, Tepeyanco, San Juan Huactzingo, San Jerónimo Zacualpan, Tetlatlahuca, Tlaxcala y Totolac; **Bio5** está presente en 56 municipios de los 60 que tiene el estado; Bio7 se encuentra en Calpulalpan, Sanctórum de Lázaro de Cárdenas, Benito Juárez y en pequeñas proporciones en Tlaxco, Españaíta y Hueyotlipan; **Bio9** se encuentra en pequeñas proporciones en San Pablo del Monte, Tenancingo, Papalotla, Santa Catarina Ayometla, Santa Cruz Quilehtla, Tepeyanco y pequeñas áreas de Panotla, Tlaxcala, San Damián Texoloc, Tetlatlahuca, San Jerónimo Zacualpan, San Juan Huactzinco y San Lorenzo Axocomanitla; **Bio15** está presente en muy pequeñas proporciones en las áreas de los municipios de Emiliano Zapata y Alzayanca y finalmente **Bio18** abarca un área muy baja en Teolocholco, San Francisco Tetlanohcan y Huamantla.

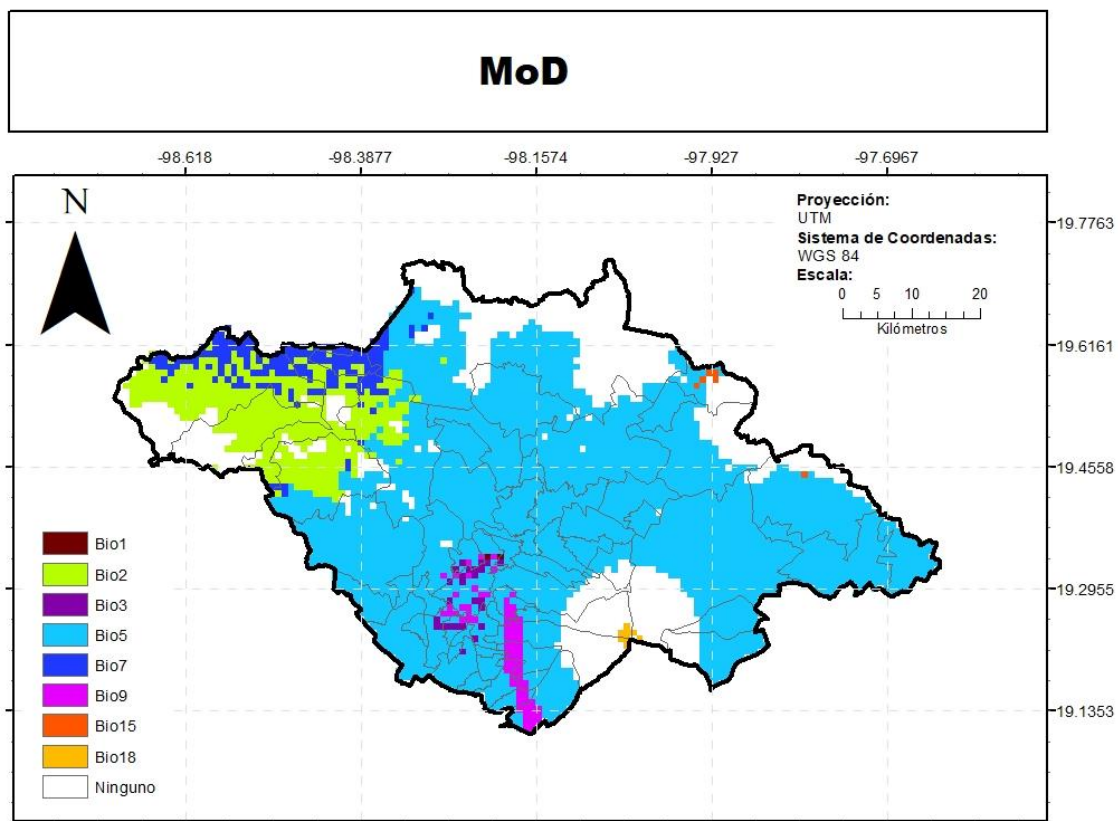


Figura 11. Análisis MoD para los 19 parámetros bioclimáticos con MaxEnt

En la Figura 12 se presenta el mapa de Novelty realizado con el programa de ExDent en él, las áreas rojas indican aquellos lugares que tienen al menos una

variable que se encuentra fuera del rango de la variable del escenario base, mientras que las áreas azules muestran aquellos lugares dentro del rango de la variable del escenario base.

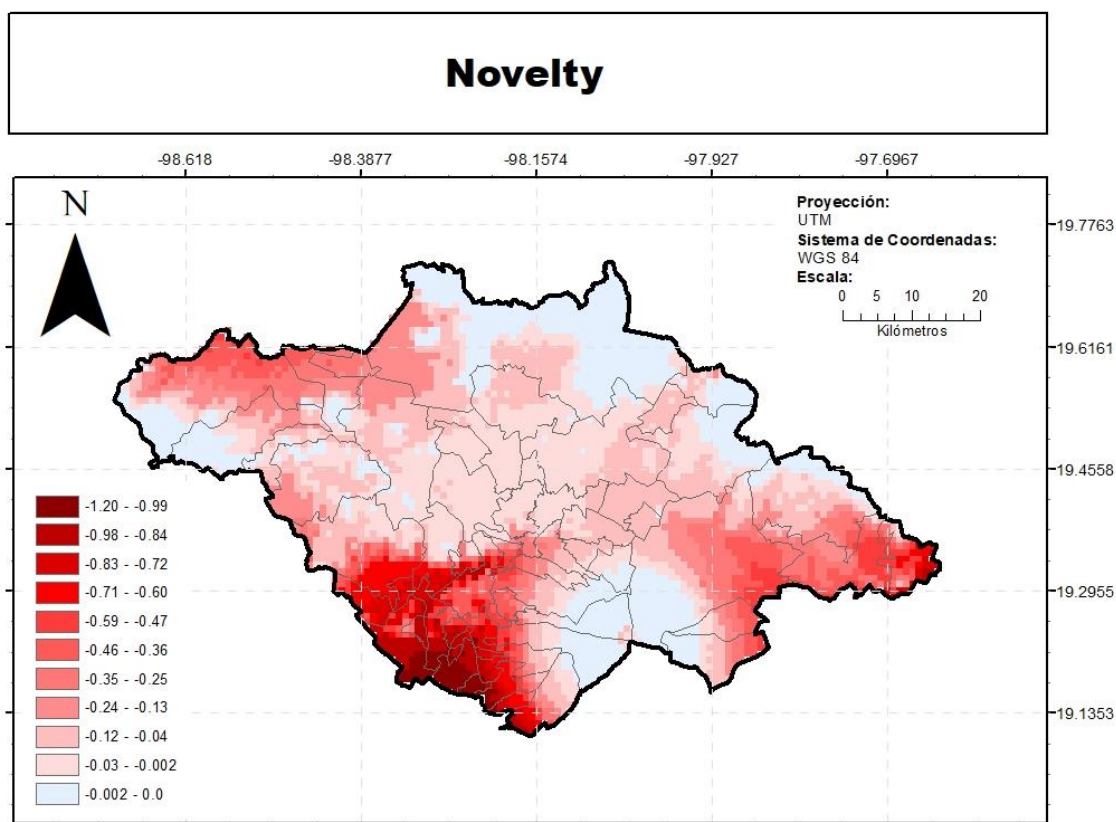


Figura 12. Análisis Noveltly para los 19 parámetros bioclimáticos con ExDet

El mapa *Most influencial covariate* realizado por el programa de ExDet en la Figura 13 muestra el parámetro bioclimático futuro que más fuera esta del rango de los parámetros bioclimáticos actuales por área. **Bio1** abarca áreas de los municipios de Calpulalpan, Nanacamilpa de Mariano Arista, Sanctórum de Lázaro Cárdenas, Españita, Benito Juárez y un área muy baja de Tlaxco; **Bio2** está presente en 56 municipios de los 60 que tiene el estado; **Bio3** se encuentra en Calpulalpan, Sanctórum de Lázaro de Cárdenas, Benito Juárez y en pequeñas proporciones en Tlaxco, Españita y Hueyotlipan; **Bio5** se encuentra en pequeñas proporciones en San Pablo del Monte, Tenancingo, Papalotla de Xicohténcatl, Santa Catarina Ayometla, Santa Cruz Quilehla, Tepeyanco y pequeñas áreas de Panotla, Tlaxcala,

San Damián Texoloc, Tetlatlahuca, San Jerónimo Zacualpan, San Juan Huactzinco y San Lorenzo Axocomanitla; **Bio7** abarca una proporción muy baja del municipio de Tlaxcala de Xicohténcatl; **Bio9** está presente en pequeñas áreas de los municipio de Zacatelco, Tepeyanco, San Juan Hyactzinco, San Jerónimo Zacualpan, Tetlatlahuca, Tlaxcala y Totolac; **Bio15** está presente en muy pequeñas proporciones en las áreas de los municipios de Emiliano Zapata y Altzayanca y finalmente **Bio18** abarca un área muy baja en Teolochoelco, San Francisco Tetlanohcan y Huamantla.

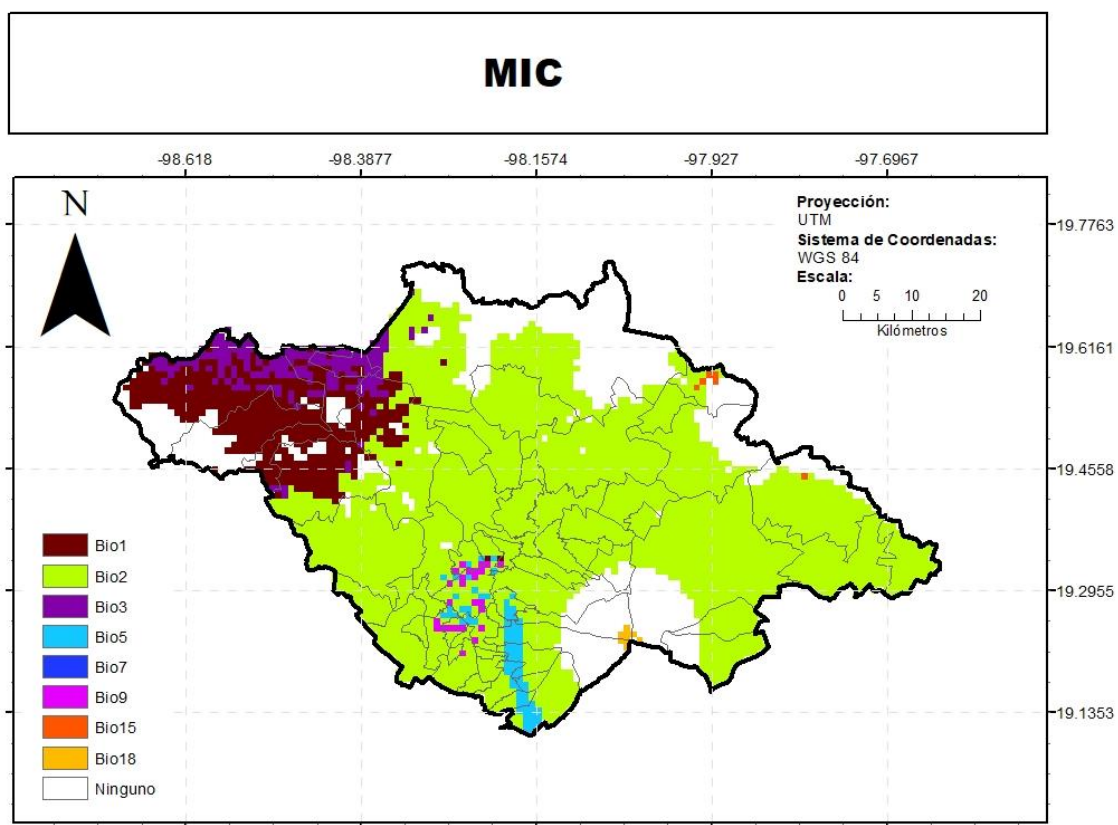


Figura 13. Análisis MIC para los 19 parámetros bioclimáticos con ExDet

En la Figura 14 se muestra el mapa del análisis MESS realizado con MaxEnt frente al mapa Novelty realizado con ExDet, se puede observar que las áreas en rojo que muestran disimilud de los parámetros bioclimáticos futuros con respecto de los actuales son iguales, así como las áreas marcadas en azul que muestran la similitud de los variables futuras dentro del rango de las variables actuales. La única

diferencia es el rango ya que el análisis MESS va de -25.0 a 31.4 y el de Novelty va de 0 a -1.2, eso debido a que utilizan un método distinto para calcular esta similitud/disimilitud. En cuanto a la comparativa del análisis MoD elaborado con MaxEnt frente al MIC producido por ExDet en la Figura 15, se aprecia que las áreas marcadas por las variables con mayor disimilitud son las mismas; sin embargo, la variable asignada en cada área es distinta para cada uno de los mapas.

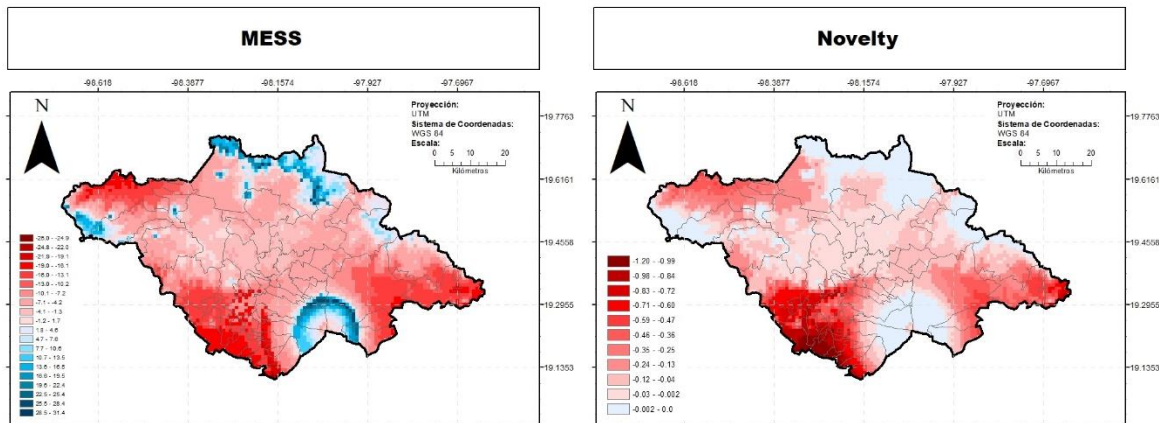


Figura 14. Comparativa entre análisis MESS de MaxEnt y análisis Novelty de ExDet

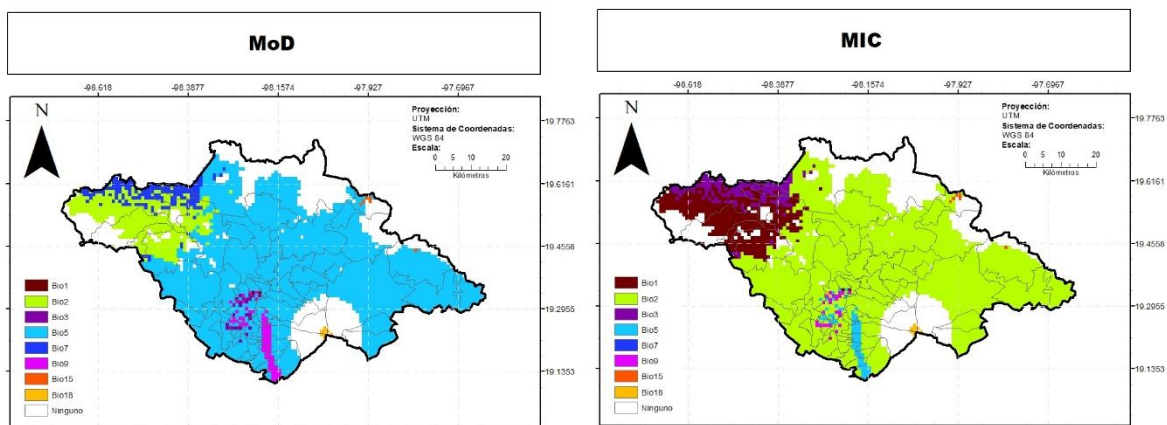


Figura 15. Comparativa entre análisis MoD de MaxEnt y análisis MIC de ExDet

Los parámetros bioclimáticos que se utilizaron en el presente trabajo son: Bio3 (Isotermalidad), Bio4 (Estacionalidad de la temperatura), Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío °C), Bio7 (Rango de temperatura anual °C) y Bio12 (Precipitación anual mm).

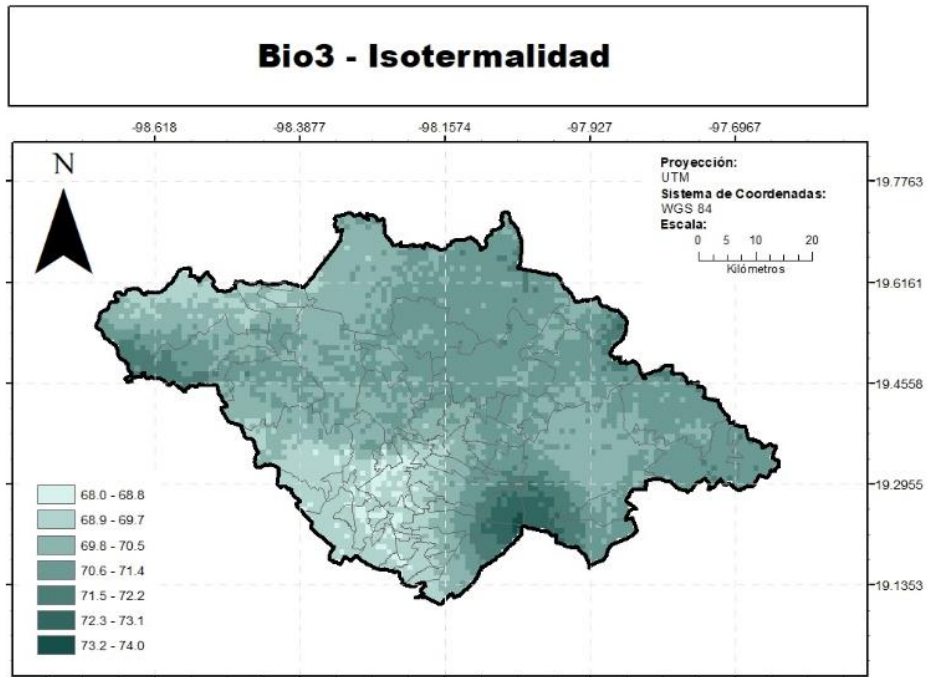


Figura 16. Parámetro bioclimático Bio3: Isotermalidad (Bio2/Bio7) (* 100)

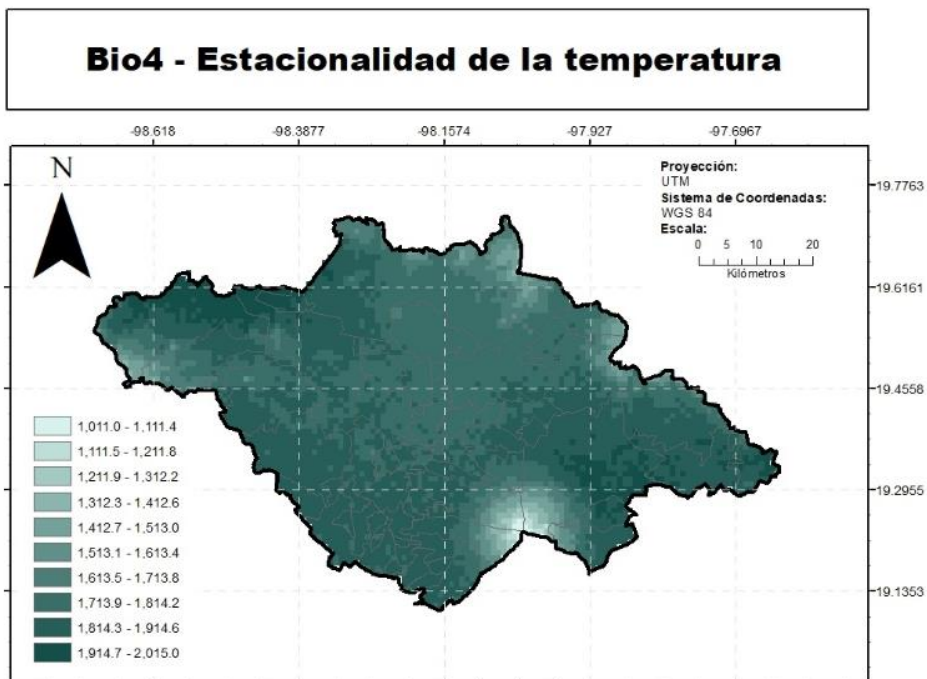


Figura 17. Parámetro bioclimático Bio4: Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)

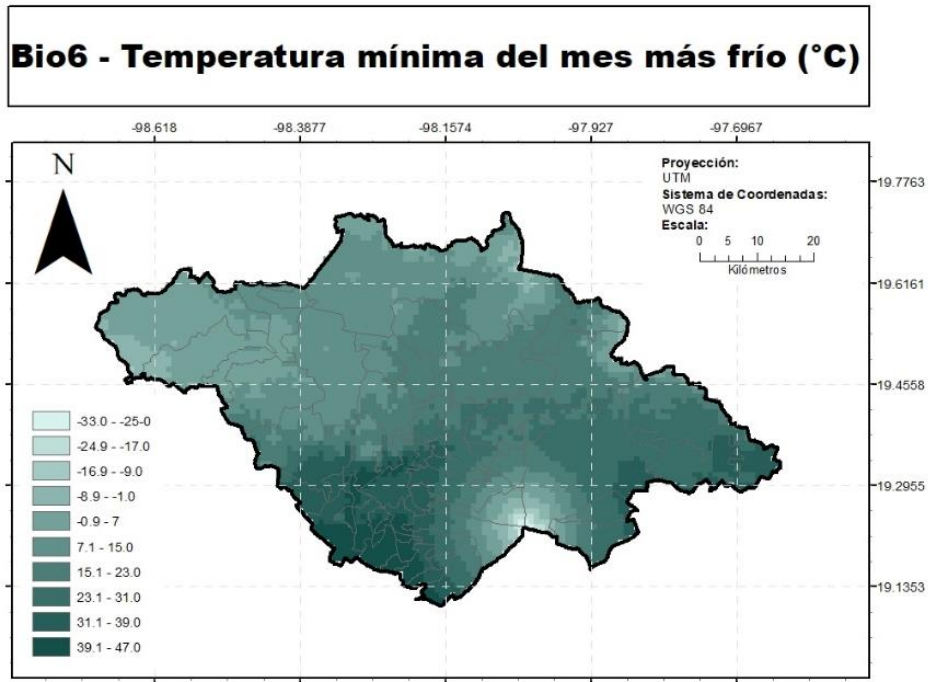


Figura 18. Parámetro bioclimático Bio6: Temperatura mínima del mes más frío (°C)

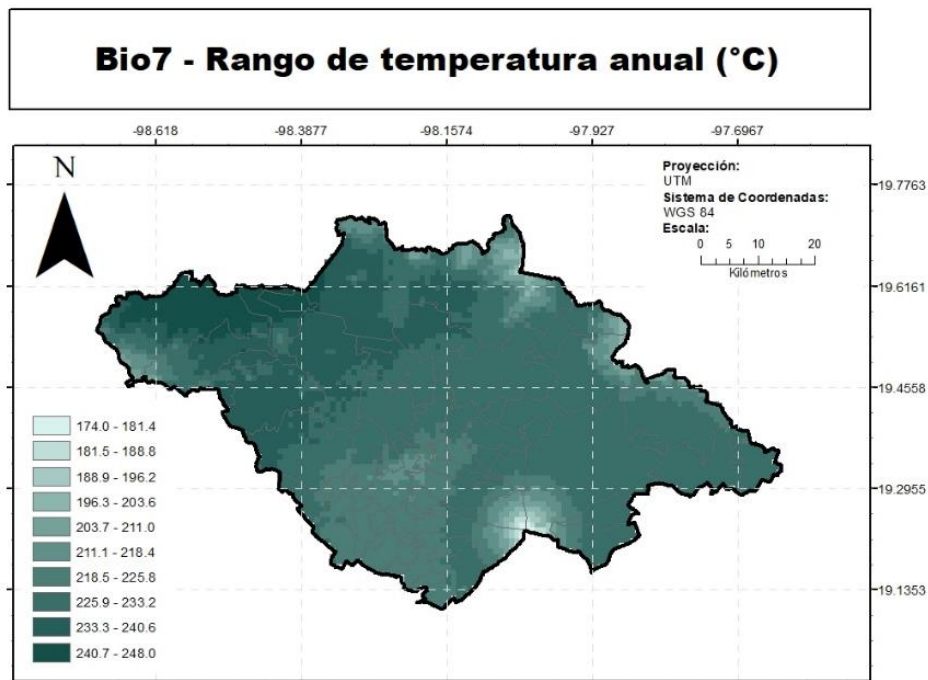


Figura 19. Parámetro bioclimático Bio7: Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C)

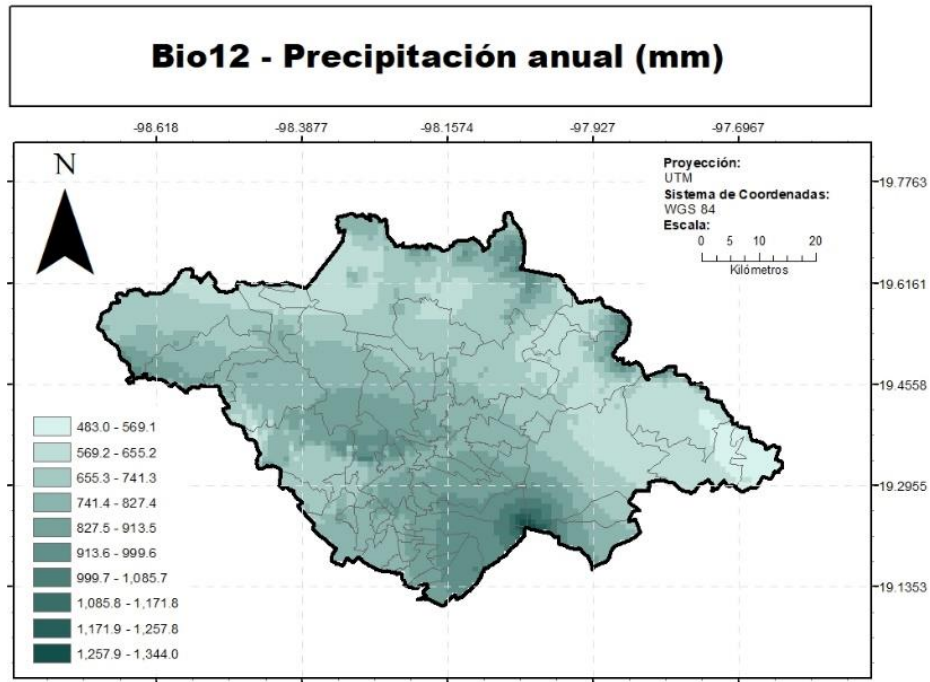


Figura 20. Parámetro bioclimático Bio12: Precipitación anual (mm)

8.2. Generación de los modelos

8.2.1. Escenario base (1960-1990)

El escenario base Figura 21 para el periodo 1960-1990 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala con un área de aptitud alta de 80, 022 ha, un área de aptitud media de 111, 509 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 191, 532 ha y un área no apta de 212, 496 ha. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.90 lo cual representa que el modelo es excelente.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual Figura 22 en un intervalo de 5.1 °C a 16.3 °C y una precipitación anual Figura 23 en un intervalo de 483 mm a 1, 344 mm.

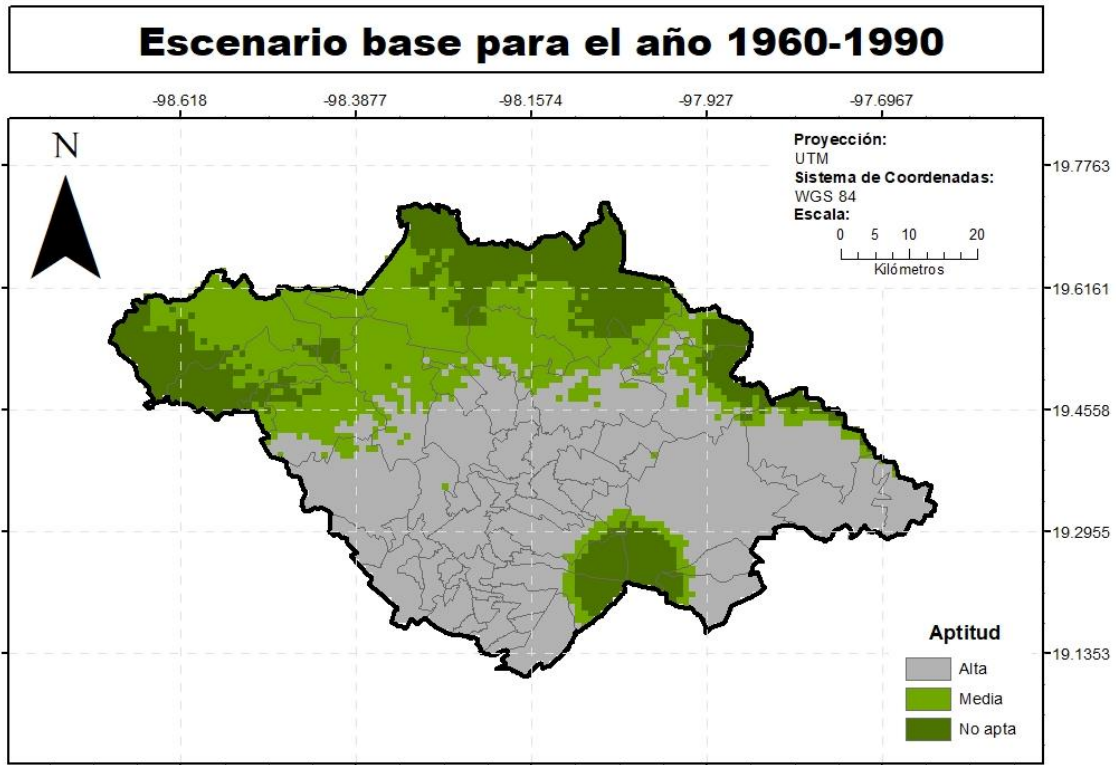


Figura 21. Escenario base para el año 1960-1990 para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala

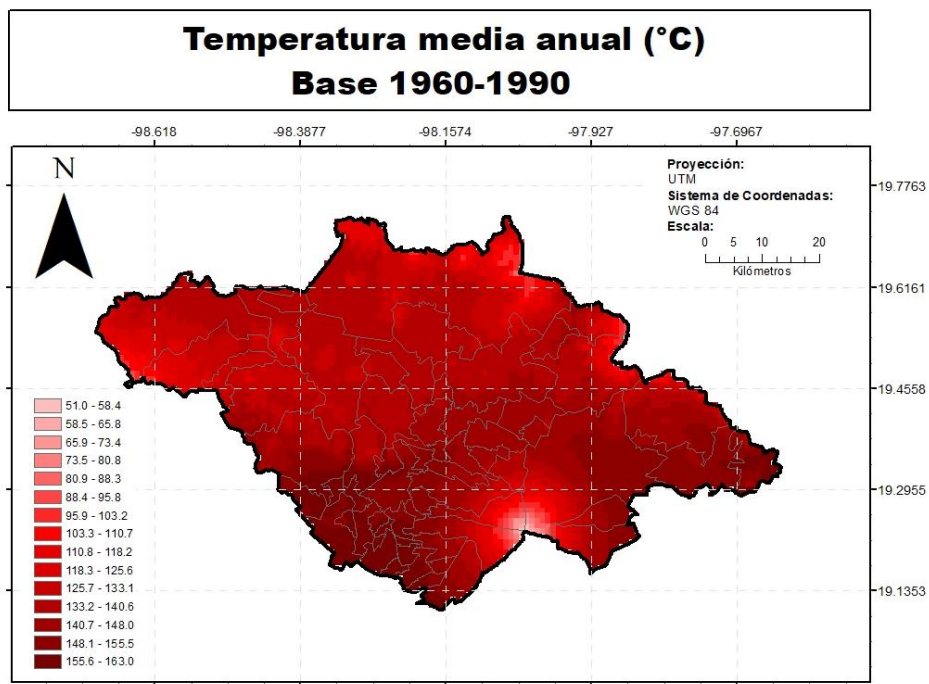


Figura 22. Mapa de isotermas del escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala

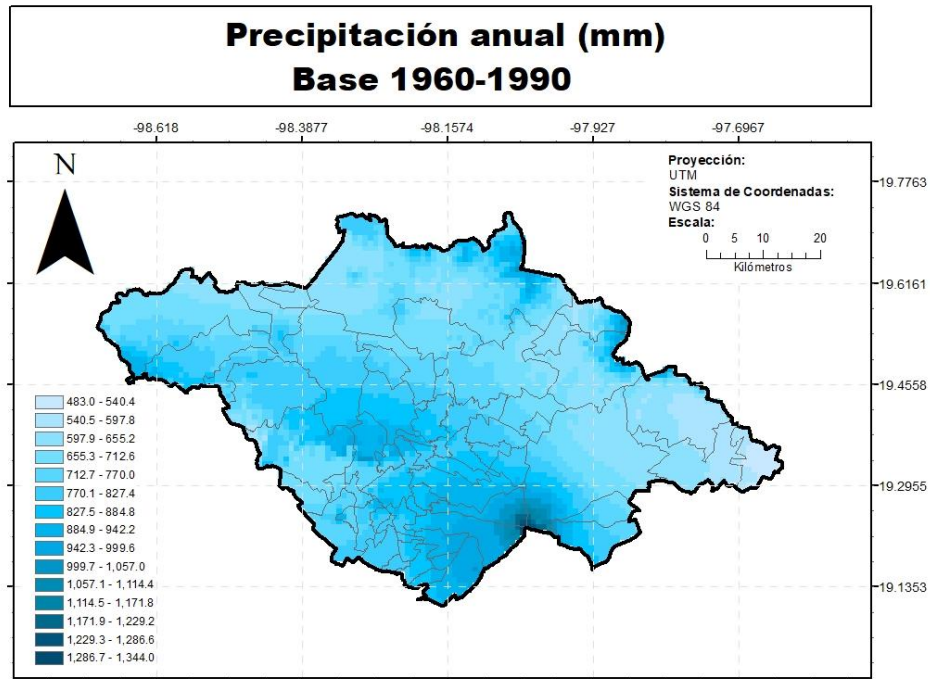


Figura 23. Mapa de isoyetas del escenario base para el año 1960-1990 en el estado de Tlaxcala

8.2.2. Escenario RCP 4.5 (2050)

El escenario RCP4.5 Figura 24 para el periodo futuro cercano 2041-2060 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC para el área de aptitud alta de 15, 907 ha, un área de aptitud media de 26, 103 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 42, 010 ha y un área no apta de 362, 018 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 78%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.90 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC para el área de aptitud alta de 79, 615 ha, un área de aptitud media de 115, 996 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 195, 610 ha y un área no apta de 208, 417 ha. Se muestra una reducción de área óptima

con respecto al escenario base de 1.9%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.911 lo cual representa que el modelo es excelente.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual (Figura 25) en un intervalo de 6.9 °C a 18.2 °C, con un aumento de 1.8 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual (Figura 26), en un intervalo de 452 mm a 1, 245 mm, con una reducción de 31 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 99 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

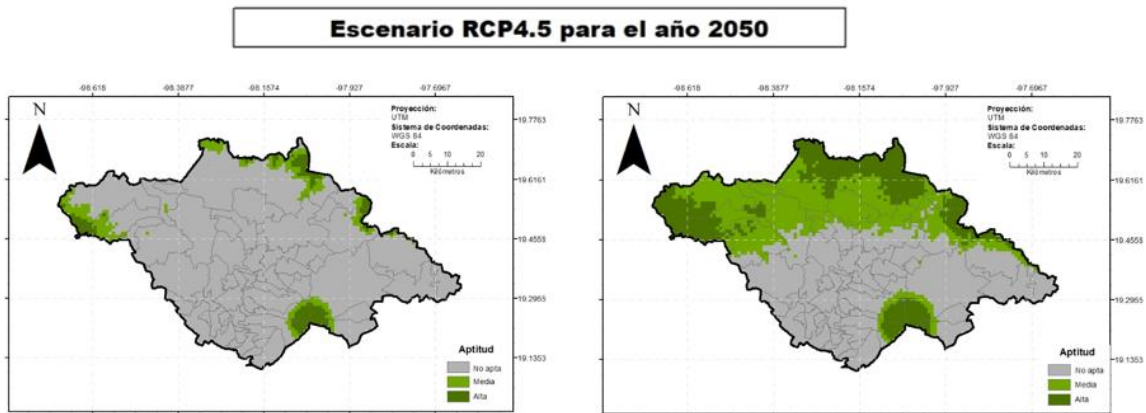


Figura 24 RCP 4.5 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC (Derecha)

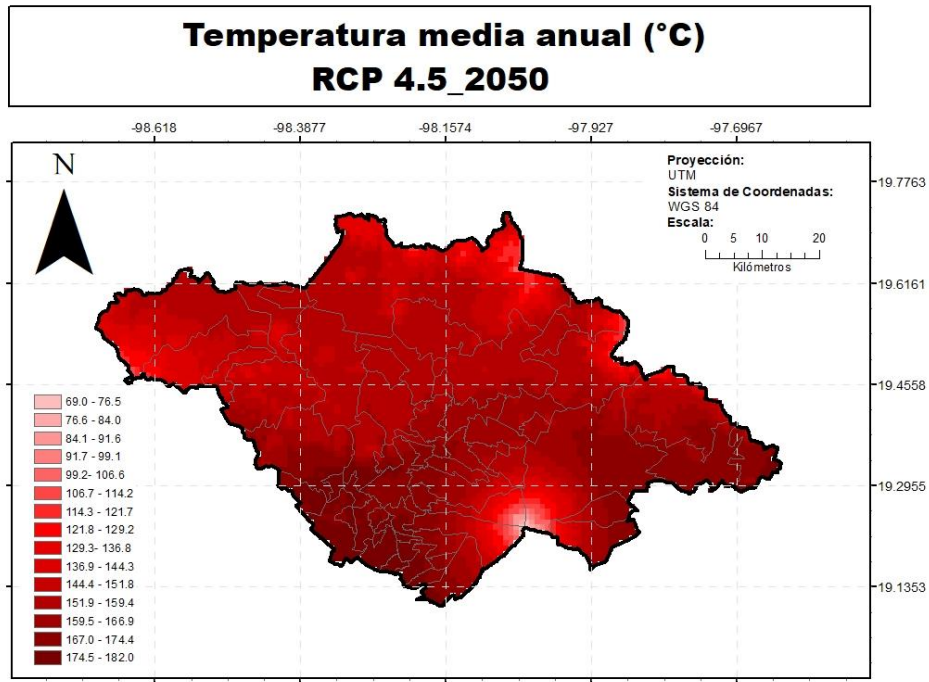


Figura 25 Mapa de isotermas del escenario 4.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

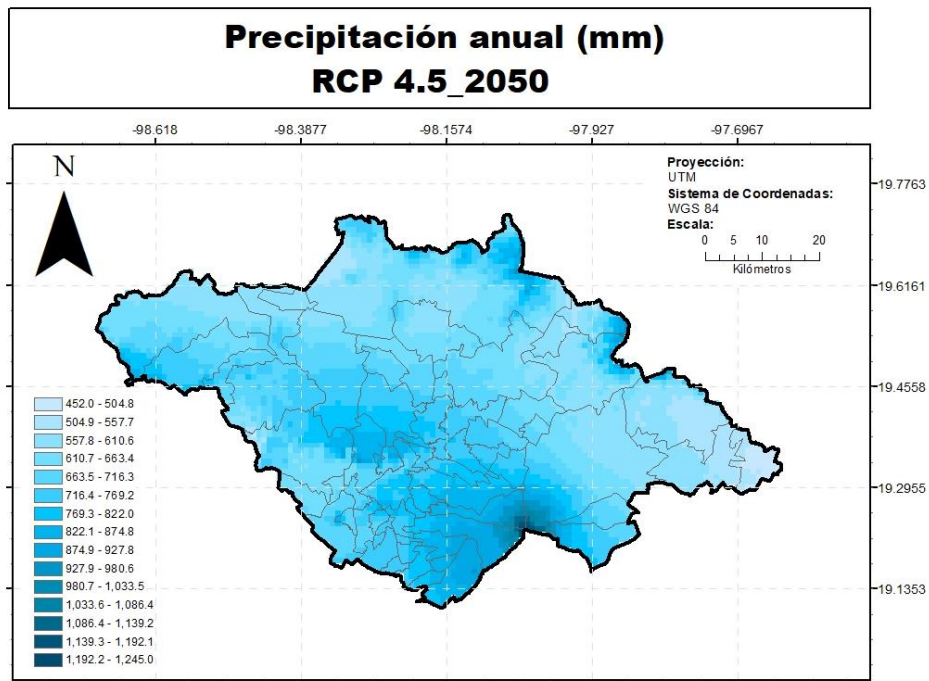


Figura 26. Mapa de isoyetas del escenario RCP4.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

8.2.3. Escenario RCP 6.0 (2050)

El escenario RCP6.0 Figura 27 para el periodo futuro cercano 2041-2060 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC en el área de aptitud alta de 9, 055 ha, un área de aptitud media de 13, 133 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 22, 188 ha y un área no apta de 381, 840 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 88%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.909 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC en el área de aptitud alta de 88, 017 ha, un área de aptitud media de 115, 996 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 99, 600 ha y un área no apta de 216, 411 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 5.9%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.905 lo cual representa que el modelo es excelente.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual Figura 28 en un intervalo de 6.9 °C a 18.1 °C, con un aumento de 1.8 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual Figura 29 en un intervalo de 484 mm a 1, 328 mm, con un aumento de 1 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 16 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

Escenario RCP6.0 para el año 2050

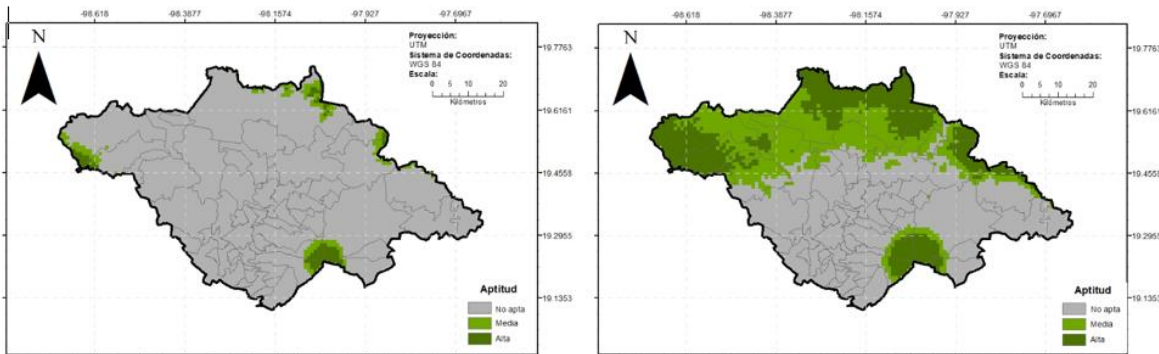


Figura 27 RCP 6.0 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC(Derecha)

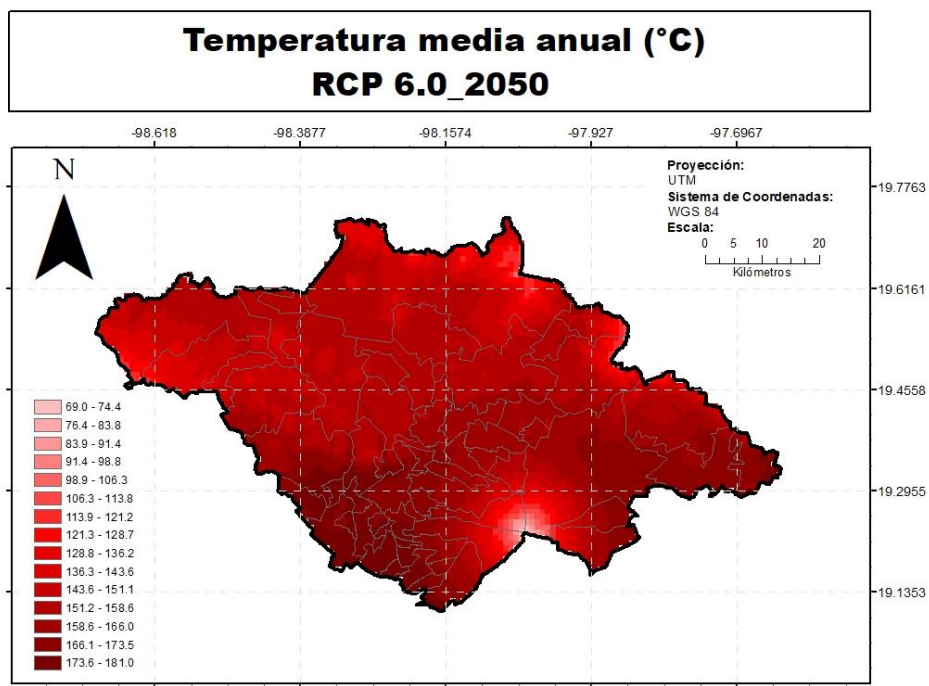


Figura 28. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

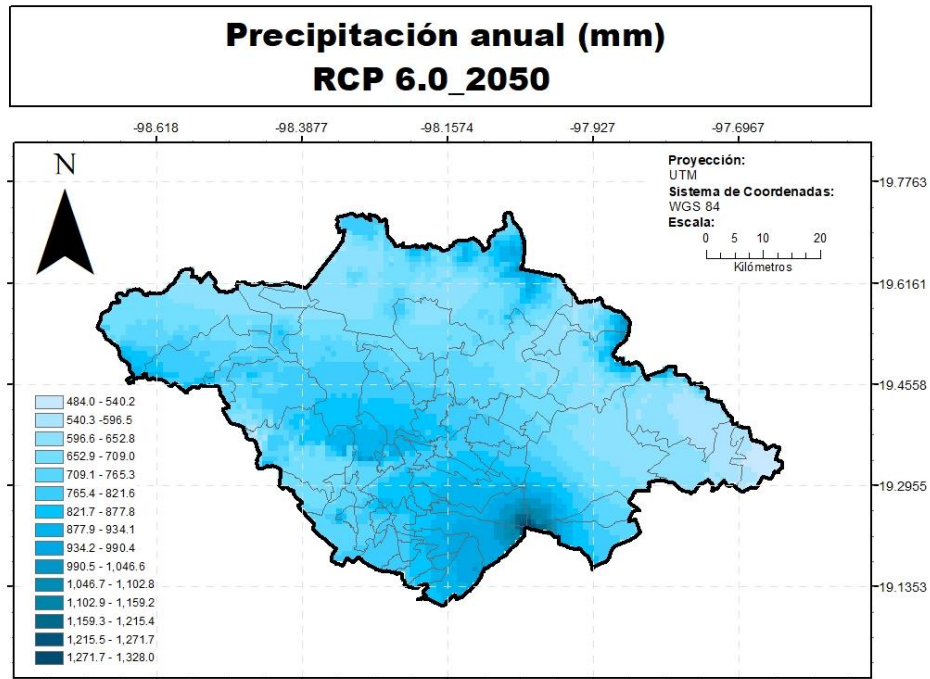


Figura 29. Mapa de isoyetas del escenario 6.0 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

8.2.4. Escenario RCP 8.5 (2050)

El escenario RCP8.5 Figura 30 para el periodo futuro cercano 2041-2060 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC para el área de aptitud alta de 8, 484 ha, un área de aptitud media de 6, 199 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 14, 683 ha y un área no apta de 389, 345 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 92%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.911 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC para el área de aptitud alta de 89, 648 ha, un área de aptitud media de 97, 071 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 186, 719

ha y un área no apta de 217, 309 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 5.9%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.898 lo cual representa que el modelo es bueno.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual (Figura 31), en un intervalo de 7.5 °C a 18.7 °C, con un aumento de 2.4 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual (Figura 32), en un intervalo de 442 mm a 1, 217 mm, con una reducción de 41 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 127 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

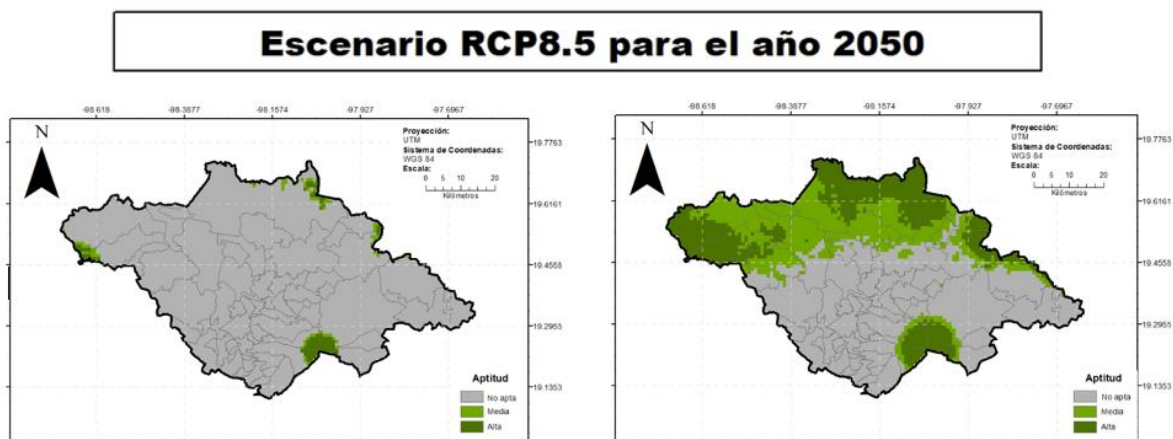


Figura 30 RCP 8.5 Año 2050. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC (Derecha)

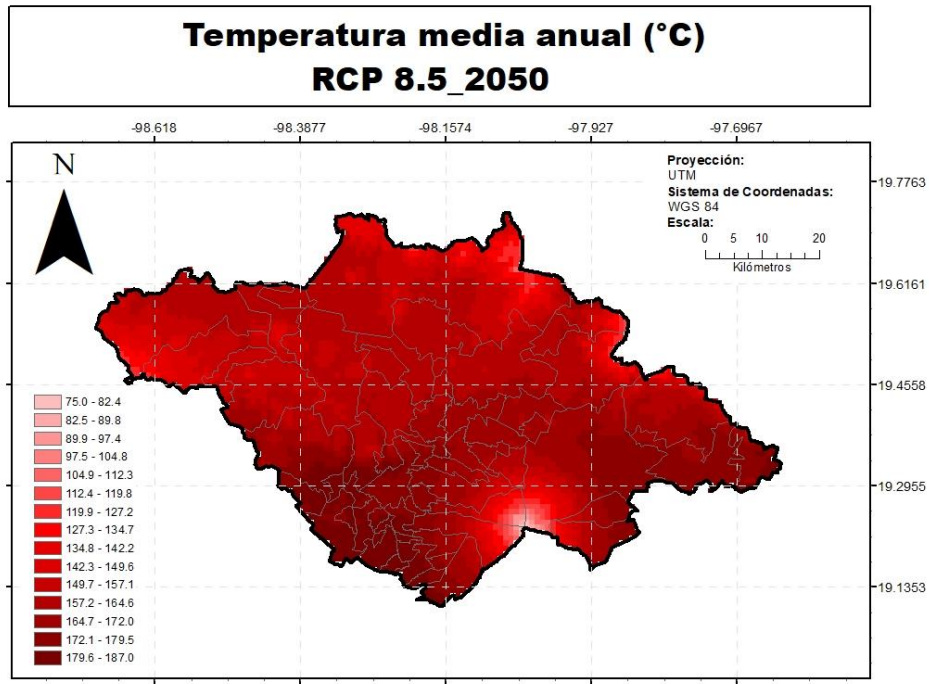


Figura 31. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

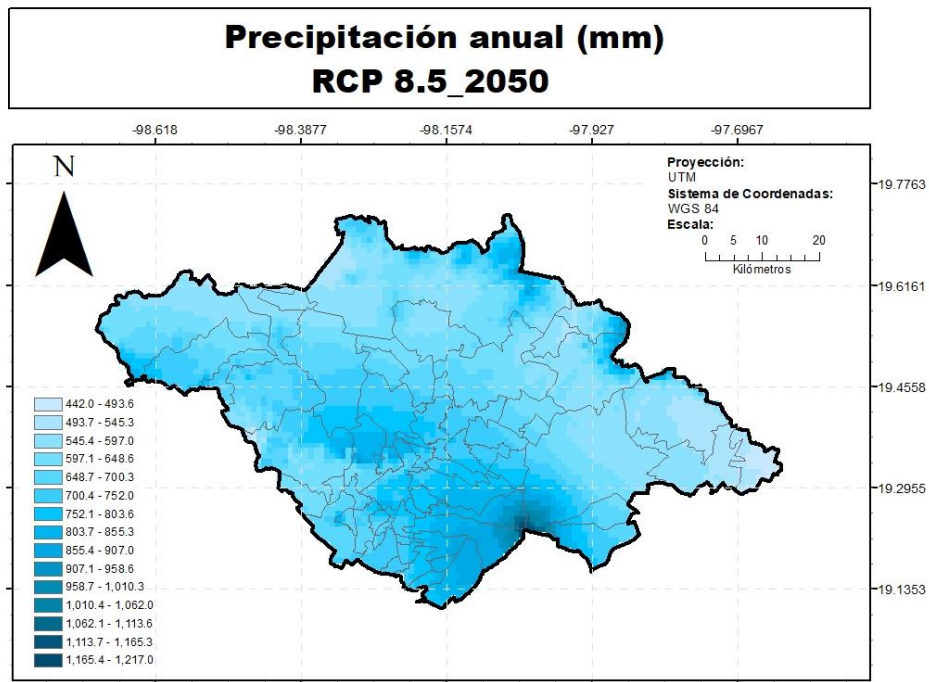


Figura 32. Mapa de isoyetas del escenario 8.5 para el año 2050 en el estado de Tlaxcala

8.2.5. Escenario RCP 4.5 (2070)

El escenario RCP4.5 Figura 33 para el periodo futuro lejano 2061-2080 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC en el área de aptitud alta de 9, 055 ha, un área de aptitud media de 11, 583 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 20, 638 ha y un área no apta de 383, 390 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 89%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.907 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC en el área de aptitud alta de 94, 950 ha, un área de aptitud media de 99, 437 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 194, 387 ha y un área no apta de 209, 641 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 2.5%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.899 lo cual representa que el modelo es bueno.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual (Figura 34), en un intervalo de 7.3 °C a 18.6 °C, con un aumento de 2.2 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual (Figura 35), en un intervalo de 449 mm a 1, 224 mm, con una reducción de 34 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 120 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

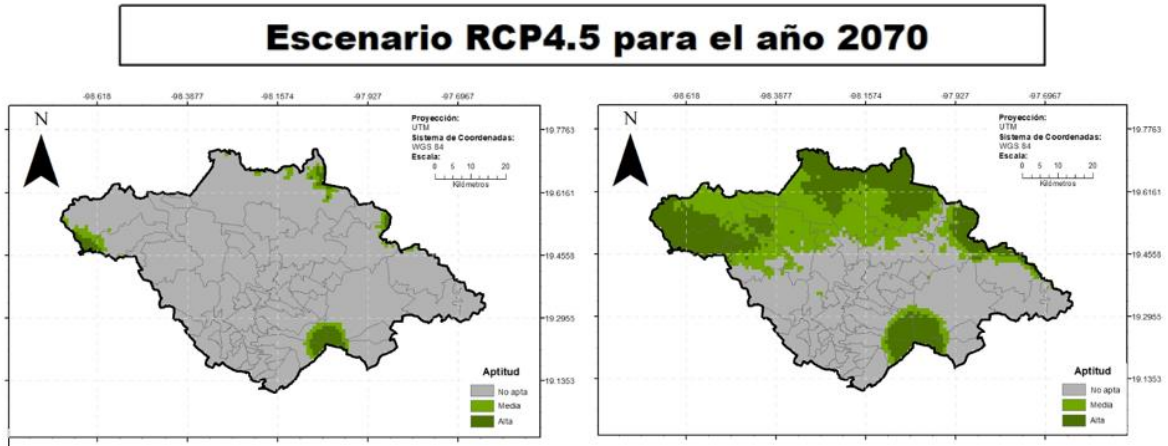


Figura 33 RCP 4.5 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC (Derecha)

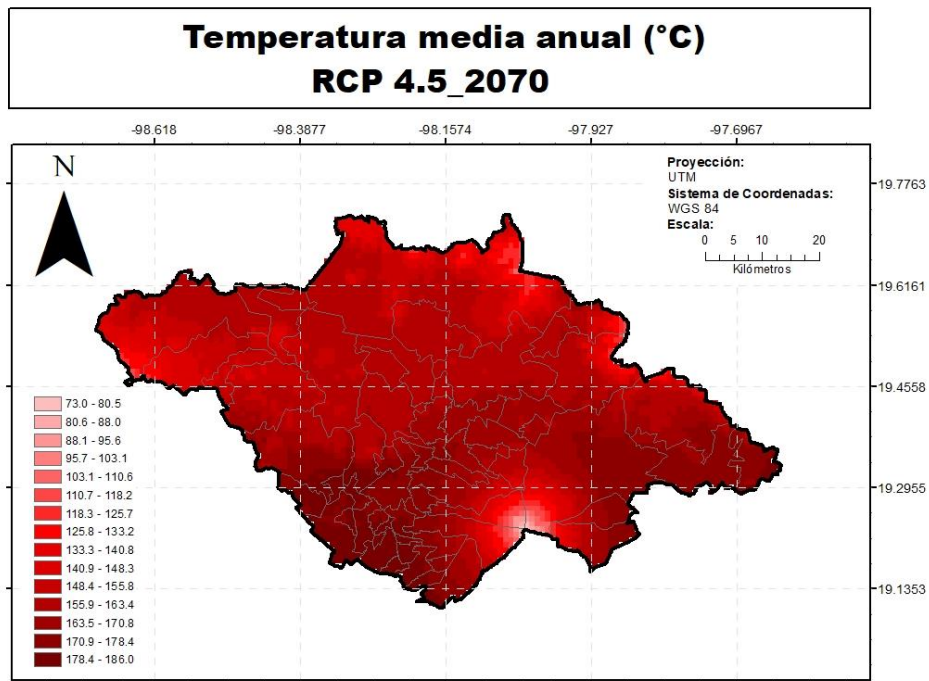


Figura 34. Mapa de isotermas del escenario 4.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

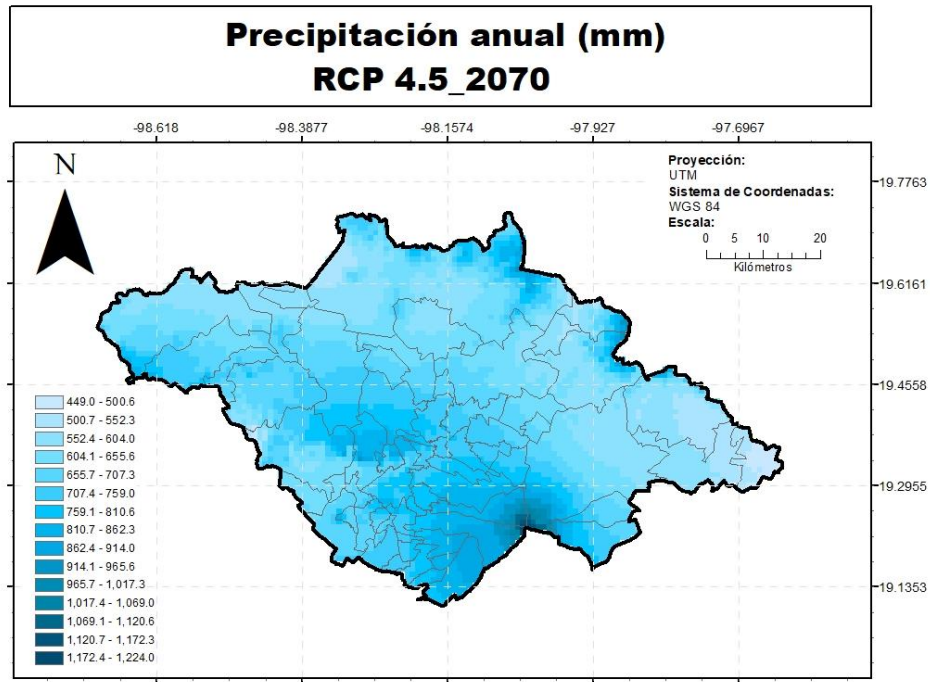


Figura 35. Mapa de isoyetas del escenario 4.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

8.2.6. Escenario RCP 6.0 (2070)

El escenario RCP6.0 Figura 36 para el periodo futuro cercano 2061-2080 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC en el área de aptitud alta de 5, 628 ha, un área de aptitud media de 7, 749 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 13, 378 ha y un área no apta de 390, 650 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 93%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.91 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC en el área de aptitud alta de 97, 805 ha, un área de aptitud media de 92, 992 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 190, 798

ha y un área no apta de 209, 641 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 4.3%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.90 lo cual representa que el modelo es bueno.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual (Figura 37), en un intervalo de 7.4 °C a 18.6 °C, con un aumento de 2.3 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual (Figura 38), en un intervalo de 462 mm a 1, 252 mm, con una reducción de 21 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 92 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

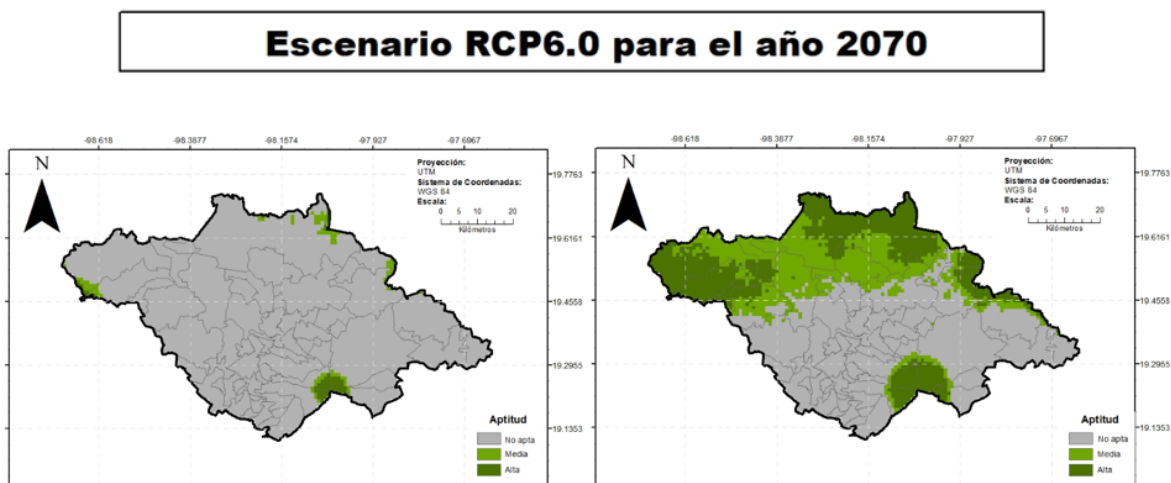


Figura 36 RCP 6.0 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC (Derecha)

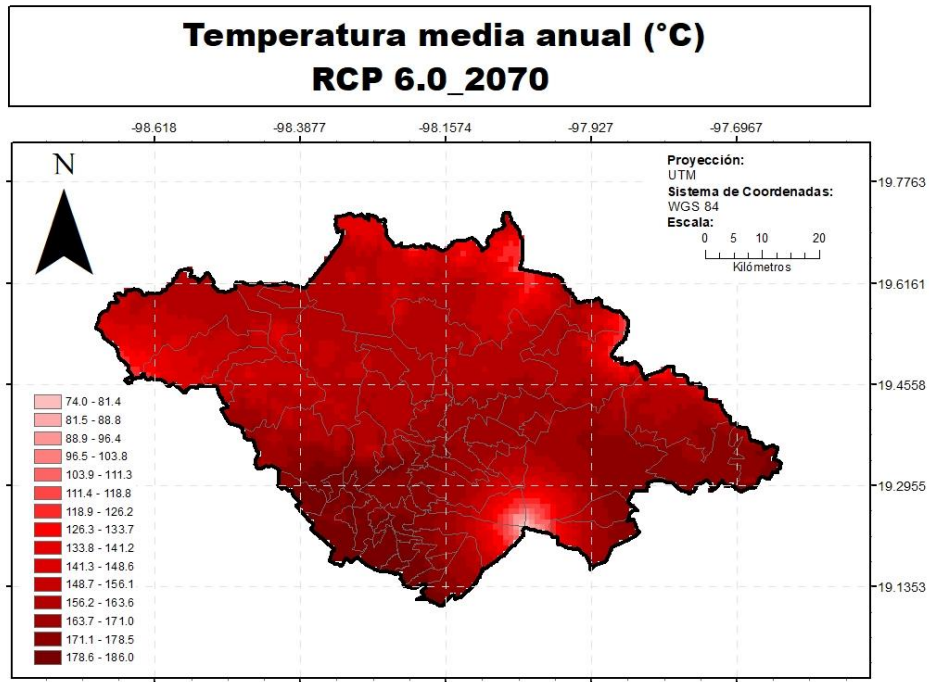


Figura 37. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

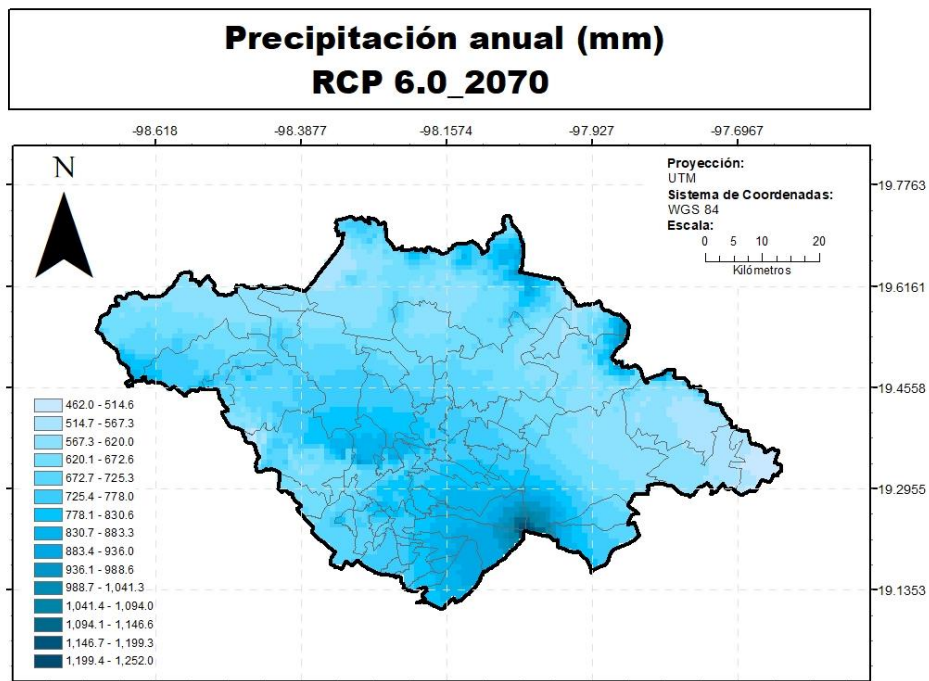


Figura 38. Mapa de isotermas del escenario 6.0 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

8.2.7. Escenario RCP 8.5 (2070)

El escenario RCP8.5 Figura 39 para el periodo futuro cercano 2061-2080 presenta la distribución potencial para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala utilizando las variables bioclimáticas siguiendo el mismo procedimiento. Una con las variables seleccionadas con MoC y comparada con MIC.

Los resultados utilizando MoC en el área de aptitud alta de 3, 834 ha, un área de aptitud media de 4, 079 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 7, 913 ha y un área no apta de 396, 115 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 96%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.907 lo cual representa que el modelo es excelente.

Los resultados utilizando MIC en el área de aptitud alta de 92, 911 ha, un área de aptitud media de 93, 237 ha; lo cual representa un área de aptitud total de 186, 148 ha y un área no apta de 217, 880 ha. Se muestra una reducción de área óptima con respecto al escenario base de 6.6%. La evaluación del modelo se hizo con el estadístico AUC, para este periodo es de 0.899 lo cual representa que el modelo es excelente.

Para este escenario se presenta una temperatura media anual (Figura 40), en un intervalo de 8.5 °C a 19.8 °C, con un aumento de 3.4 °C con respecto al escenario base y una precipitación anual (Figura 41), en un intervalo de 420 mm a 1, 139 mm, con una reducción de 63 mm para el valor mínimo de precipitación y una reducción de 205 mm para el valor máximo de precipitación presente con respecto al escenario base.

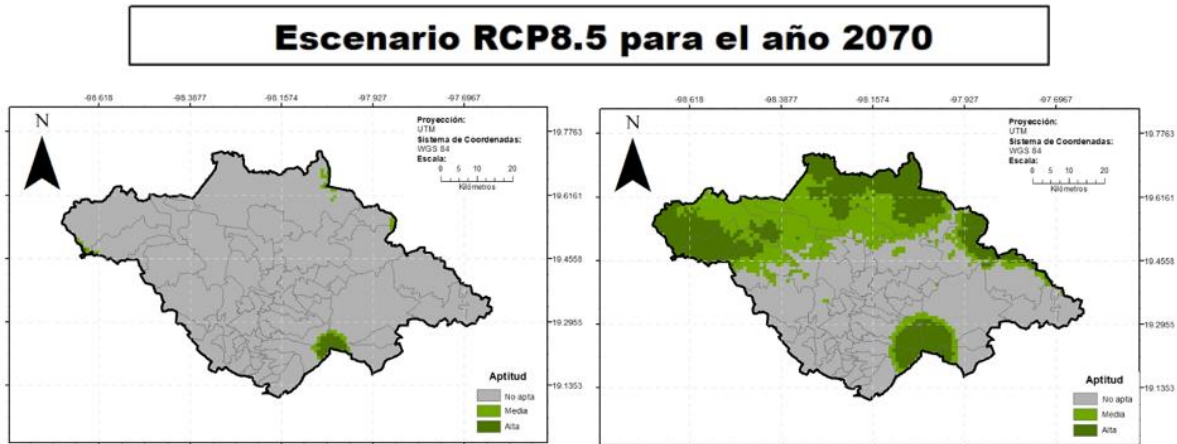


Figura 39 RCP 8.5 Año 2070. Selección de variables bioclimáticas utilizado MoC (Izquierda) y MIC (Derecha)

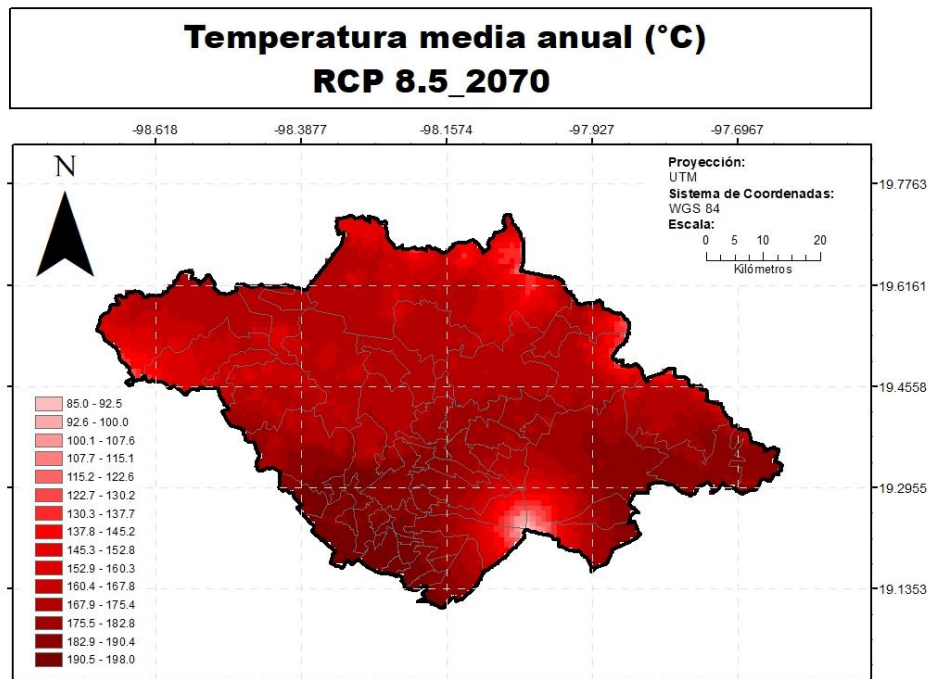


Figura 40. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

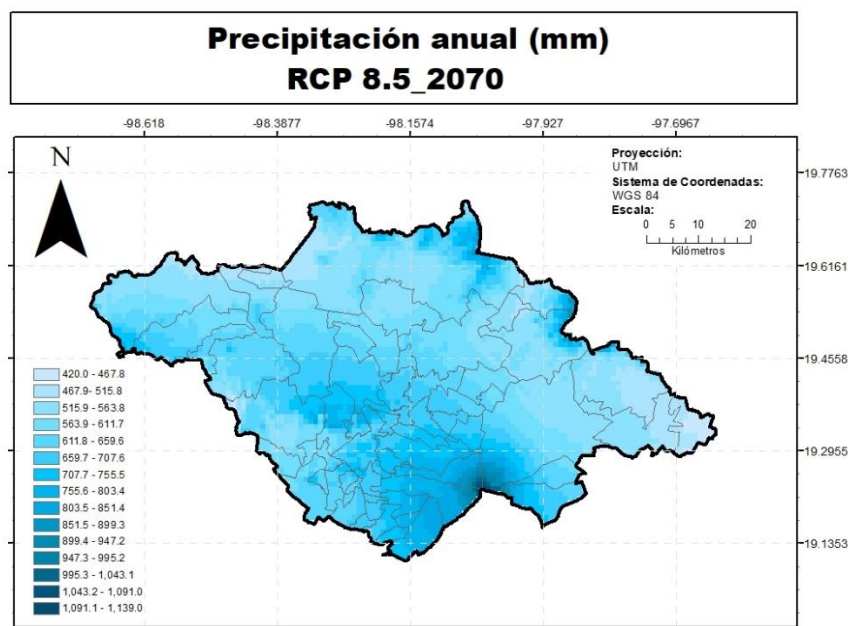


Figura 41. Mapa de isotermas del escenario 8.5 para el año 2070 en el estado de Tlaxcala

En las Tablas IV y V se indican las condiciones ambientales extremas de los parámetros bioclimáticos utilizados en la distribución potencial de *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala para el escenario base y los escenarios futuros para los años 2050 y 2070 respectivamente.

Tabla IV. Valores extremos de los parámetros bioclimáticos para los escenarios base y futuro del año 2050

	Bio3	Bio4	Bio6	Bio7	Bio12
Base	6.8-7.4	101.1-201.5	-3.3-4.7	17.4-24.8	483-1344
RCP4.5_2050	6.7-7.3	110.4-209.9	-1.9-6	18.5-26.1	452-1245
RCP6.0_2050	6.7-7.2	112.1-209.6	-1.7-6.2	18.2-25.9	484-1328
RCP8.5_2050	6.7-7.3	107.3-209.0	-1.2-6.8	18.4-26.0	442-1217

Tabla V. Valores extremos de los parámetros bioclimáticos para los escenarios base y futuro del año 2070

	Bio3	Bio4	Bio6	Bio7	Bio12
Base	6.8-7.4	101.1-201.5	-3.3-4.7	17.4-24.8	483-1344
RCP4.5_2070	6.7-7.3	106.6-204.2	-1.3-6.6	18.6-26.2	449-1224
RCP6.0_2070	6.8-7.3	113.2-209.9	-1.4-6.6	18.3-25.8	462-1252
RCP8.5_2070	6.7-7.1	114.8-219.8	-0.6-7.5	19.5-27.0	420-1139

En las Tablas VI y VII se muestra los valores extremos, media y desviación estándar de la temperatura media anual y de la precipitación anual presentes en el escenario base y futuros para el año 2050 y 2070 respectivamente.

Tabla VI. Medidas de tendencia central de la temperatura media anual y precipitación de los escenarios actual y futuros para el año 2050

Temperatura media anual (°C)				
	Min	Max	Media	Desv. Estándar
Base	5.1	16.3	13.78	1.36
RCP4.5	6.9	18.2	15.60	1.36
RCP6.0	6.9	18.1	15.55	1.36
RCP8.5	7.5	18.7	16.13	1.36
Precipitación anual (mm)				
Base	483	1344	749.29	111.67
RCP4.5	452	1245	687.71	102.48
RCP6.0	484	1328	740.47	109.45
RCP8.5	442	1217	670.80	100.02

Tabla VII. Medidas de tendencia central de la temperatura media anual y precipitación de los escenarios actual y futuros para el año 2070

Temperatura media anual (°C)				
	Min	Max	Media	Desv. Estándar
Base	5.1	16.3	13.78	1.36
RCP4.5	7.3	18.6	15.99	1.36
RCP6.0	7.4	18.6	16.04	1.35
RCP8.5	8.5	19.8	17.13	1.36
Precipitación anual (mm)				
Base	483	1344	749.29	111.67
RCP4.5	449	1224	677.49	99.78
RCP6.0	462	1252	694.89	101.56
RCP8.5	420	1139	623.49	91.92

En las tablas VIII, IX, X y XI se presentan las áreas potenciales en hectáreas para la distribución potencial base y futuro para los años 2050 y 2070 respectivamente, así como el porcentaje de reducción de área para cada uno de los escenarios con respecto al escenario base.

Tabla VIII. Áreas potenciales de *Pinus hartwegii* para el escenario base y futuros para el año 2050 utilizando MoC

	No Apta	Aptitud Media	Aptitud Alta	Aptitud Total	% Reducción
Base	212,495.83	111,509.33	80,022.42	191,531.75	NA
RCP4.5	362,017.85	26,103.13	15,906.60	42,009.73	78
RCP6.0	383,389.79	11,583.27	9,054.52	20,637.79	89
RCP8.5	381,839.91	13,133.14	9,054.52	22,187.66	88

Tabla IX. Áreas potenciales de *Pinus hartwegii* para el escenario base y futuros para el año 2070 utilizando MoC

	No Apta	Aptitud Media	Aptitud Alta	Aptitud Total	% Reducción
Base	212,495.83	111,509.33	80,022.42	191,531.75	NA
RCP4.5	390,649.72	7,749.37	5,628.49	13,377.86	93
RCP6.0	389,344.56	6,199.49	8,483.52	14,683.01	92
RCP8.5	396,115.06	4,078.61	3,833.90	7,912.51	96

Tabla X Áreas potenciales de *Pinus hartwegii* para el escenario base y futuros para el año 2050 Utilizando MIC

	No Apta	Aptitud Media	Aptitud Alta	Aptitud Total	% Reducción
Base	204,665	120,482	78,880	199,363	NA
RCP4.5	208,417	115,996	79,615	195,610	1.9
RCP6.0	216,411	99,600	88,017	187,616	5.9
RCP8.5	217,309	97,071	89,648	186,719	6.3

Tabla XI Áreas potenciales de *Pinus hartwegii* para el escenario base y futuros para el año 2070 Utilizando MIC

	No Apta	Aptitud Media	Aptitud Alta	Aptitud Total	% Reducción
Base	204,665	120,482	78,880	199,363	NA
RCP4.5	209,641	99,437	94,950	194,387	2.5
RCP6.0	213,230	92,992	97,805	190,798	4.3
RCP8.5	217,880	93,237	92,911	186,148	6.3

8.3. Evaluación y validación de los modelos

En la figura 42 se muestra la Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) para los mismos datos, haciendo un promedio sobre las ejecuciones repetidas. La especificidad se define utilizando el área de fondo (background), en lugar de la

verdadera comisión. La línea roja muestra como es el ajuste de los datos de entrenamiento en el modelo, la línea azul muestra el ajuste de los datos de prueba en el modelo. La línea negra muestra la línea que se espera si el modelo no fuera mejor que un modelo aleatorio.

En la tabla XII, XIII, XIV y XV se presenta el AUC de entrenamiento promedio para las corridas repetidas obtenido para los distintos escenarios, así como la desviación estándar de cada uno de ellos.

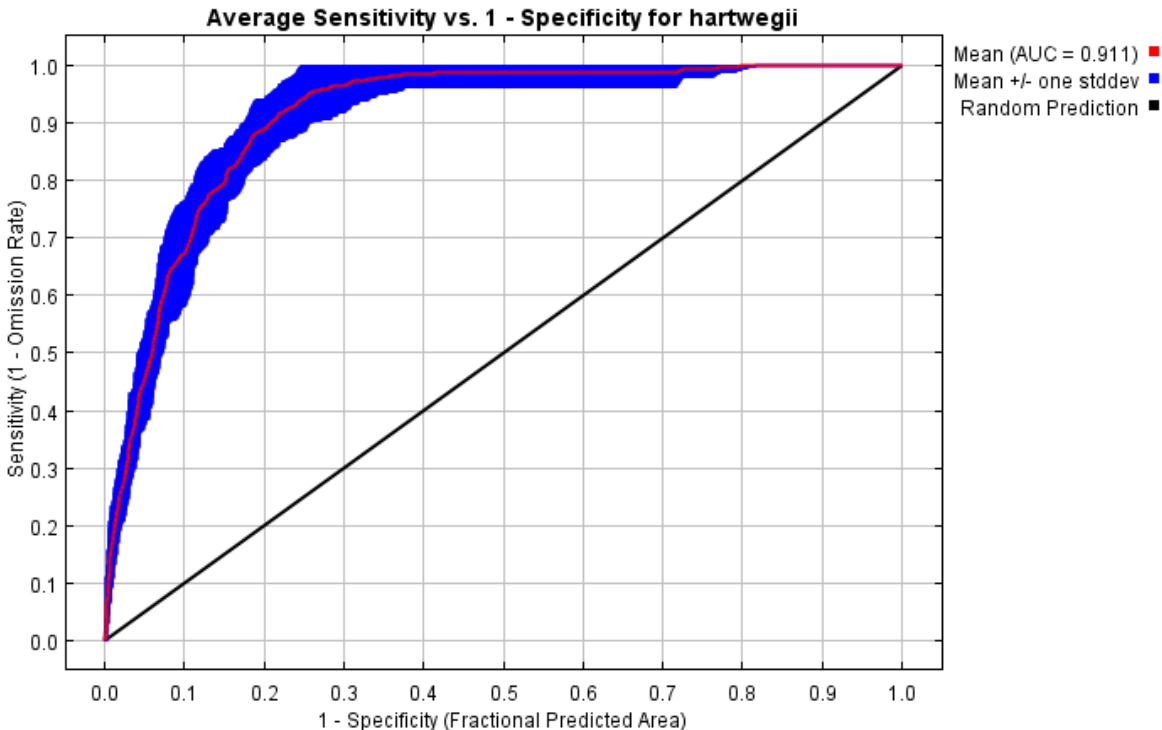


Figura 42. Curva de Característica Operativa Relativa (ROC) promedio de 30 réplicas

Tabla XII. AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2050 utilizando MoC

	AUC	Desv. Estándar
Base	0.9	0.022
RCP4.5	0.9	0.022
RCP6.0	0.909	0.015
RCP8.5	0.911	0.023

Tabla XIII. AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2070 utilizando MoC

	AUC	Desv. Estándar
Base	0.9	0.022
RCP4.5	0.907	0.017
RCP6.0	0.91	0.016
RCP8.5	0.907	0.017

Tabla XIV AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2050 utilizando MIC

	AUC	Desv. Estándar
Base	0.902	0.023
RCP4.5	0.911	0.011
RCP6.0	0.905	0.017
RCP8.5	0.898	0.021

Tabla XV AUC y desviación estándar para el escenario base y futuros para el año 2070 utilizando MIC

	AUC	Desv. Estándar
Base	0.902	0.023
RCP4.5	0.899	0.023
RCP6.0	0.900	0.017
RCP8.5	0.899	0.026

IX. DISCUSIÓN

La combinación de incremento de temperatura y decremento de la precipitación provocará un aumento significativo de la aridez en el país, con severas consecuencias en el deterioro de la vegetación natural y la disminución de la producción agrícola, pecuaria y forestal a combinación de mayor temperatura y menor precipitación, causará que México tenga un clima más árido en el futuro. Esto se traducirá en la expansión de las zonas que ya tienen un clima árido o semiárido y una reducción de las áreas con climas cálido-húmedo o templado y frío-húmedo. (Sáenz-Romero, 2014). Estudios realizados en diversas latitudes y altitudes señalan a los ecosistemas de bosques de clima boreal y templado como los más sensibles al cambio climático (IPCC, 2007; IPCC 2014).

Existen diversos estudios sobre modelos del efecto del cambio climático en la distribución potencial de especies de *Pinus* para México. Todos estos estudios incluyendo el de este trabajo concuerdan en una reducción en la distribución potencial en años venideros debido al efecto del cambio climático.

Las variables bioclimáticas que mayor significancia tienen en la distribución de la especie de *Pinus hartwegii* para este estudio son Bio6, Bio4, Bio7, Bio12 y Bio3 en orden de importancia, en el trabajo de Manzanilla-Quiñones se determinó que las variables bioclimáticas relevantes eran Bio1, Bio12, Bio16 y Bio18 para esta especie en el Eje Neovolcánico Transversal, por otro lado, Aceves-Rangel, *et al.*, (2018) asignaron las variables más significativas a Bio10 y Bio12 para *P. hartwegii* en México.

De acuerdo con el IPCC (2018) los valores de temperatura estimados de acuerdo a las actividades antropogénicas con respecto a los niveles preindustriales son de 1°C, con un rango probable de 0.8°C a 1.2°C y se espera que el calentamiento global llegue a 1.5°C entre el 2030 y 2052 si se tiene el ritmo actual.

Los valores de precipitación para el modelo CCSM4 utilizado en este trabajo se vieron disminuidos de un 1 a 127 mm para el año 2050, y de 20 a 205 mm para el

año 2070; los de temperatura aumentaron de 1.8°C a 2.4°C para el año 2050 y de 2.2°C a 3.5°C para el año 2070, resultados similares obtuvieron Manzanilla-Quiñones, *et al*; (2019) indican un aumento de temperatura de 1.5°C a 2.1 °C para el modelo HADGEM2_ES para el año 2050 y de 0.7°C a 1.1°C para el modelo CRNMCM5 para el año 2050; con Arriaga y Gómez (2007) muestran un aumento en la temperatura de 1.7°C a 3°C y una disminución de precipitación de 10 a 365 mm con el modelo HadCM2 para el año 2050.

Los modelos presentados en este trabajo determinan que *Pinus hartwegii* tendrá una disminución de área potencial debido al cambio climático del 78% a un 88% para el año 2050 y de un 93% a un 96% para el año 2070 con el modelo CCSM4 en comparación al escenario base, si se utiliza únicamente las herramientas que nos provee MaxEnt, estos datos concuerdan con Manzanilla-Quiñones que presentan una reducción de área que va de un 11.7% con el modelo CRNMCM5 para el RCP4.5 en el año 2050 a un 26.9% con el modelo HADGEM2_ES para el RCP8.5 en el año 2050, con Arriaga y Gómez (2007) utilizando el modelo HADCM2 para el año 2050 se presenta una reducción de área de 41.49%, con Gutiérrez y Trejo (2014) con el modelo HADGEM1 y escenario de emisión A2 hubo una reducción del 80% con respecto al escenario base y para el escenario de emisión B2 la reducción fue del 77%; con el modelo MPIECHAM5 para el escenario de emisión A2 el porcentaje de cambio fue de 86% y para el escenario B2 fue una reducción de 82% con respecto al escenario base.

Los modelos presentados en este trabajo determinan que *Pinus hartwegii* tendrá una disminución de área potencial debido al cambio climático del 1.9% a un 6.3% para el año 2050 y de un 2.5% a un 6.6% para el año 2070 con el modelo CCSM4 en comparación al escenario base si se utilizan la herramienta que provee ExDET.

Los trabajos encontrados sobre el efecto del cambio climático en *Pinus hartwegii* concuerdan en una disminución de sus áreas potenciales en distintos porcentajes, lo cual concuerda con Arriaga y Gómez (2004) que menciona que los bosques de alta montaña sufrirán reducciones considerables de sus superficies, debido a que son desplazados por especies que se establecen en zonas con mayor altitud

adaptadas a las condiciones de temperatura más elevadas y con características climáticas aptas para estas nuevas temperaturas.

X. CONCLUSIONES

Se seleccionaron cinco parámetros bioclimáticos de los 19 disponibles para la realización de este trabajo las cuales son Bio3 (Isotermalidad), Bio4 (Estacionalidad de la temperatura), Bio6 (Temperatura mínima del mes más frío °C), Bio7 (Rango de temperatura anual °C) y Bio12 (Precipitación anual mm). Estas variables fueron seleccionadas de acuerdo a una correlación para evitar usar variables altamente relacionadas, análisis de Jackknife para ver la importancia de las variables, análisis MESS y MOC de MaxEnt y un análisis Novelty y MIC de ExDet para ver la disimilitud de las variables actuales y futuras.

En cuanto a las variables de precipitación anual y temperatura media anual se reporta para el modelo CCSM4 un aumento en la temperatura de 1.8°C a 2.4°C para el año 2050 y de 2.2°C a 3.5°C para el año 2070, por otro lado, se presenta una disminución de 1 a 127 mm para el año 2050 y de 20 a 205 mm para el año 2070 en el estado de Tlaxcala.

El modelo de distribución potencial actual muestra ciertas zonas con aptitud alta que cuentan con las condiciones de precipitación y temperatura viables para *Pinus hartwegii* en el estado de Tlaxcala en los municipios de Nanacamilpa de Mariano Arista, Calpulalpan, Tlaxco, Emiliano Zapata, Terrenate, Atlzayanca y la zona del Parque Nacional la Malinche, que proporcionan 80 022.42 ha de aptitud alta y 111 509.33 ha de aptitud media.

El modelo de distribución potencial que menor reducción de área presentó con respecto al escenario base fue la trayectoria de concentración representativa RCP 4.5 para el año 2050 con un 78% y el que mayor porcentaje de reducción de área tuvo fue la trayectoria RCP 8.5 para el año 2070 con un 96%, con estos datos es posible aceptar la hipótesis planteada en este trabajo.

Sin embargo, siguiendo el mismo procedimiento citado en la literatura que consiste en eliminar las variables que más variación tengan, tendríamos que eliminar BIO 3

(tomando como referencia los resultados de MIC). La reducción potencial para el año 2050 va de 1.9% a 6.3% y para el año 2070 va de 2.5% a 6.6%.

XI. LITERATURA CITADA

- Aceves-Rangel, L., Méndez-González, J., García-Aranda, M., & Nájera-Luna, J. (2017). Distribución Potencial Actual de 20 Especies de Pinos en México. Saltillo, Coahuila.
- Aguirre-Gutiérrez, J., & Duivenvoorden, J. (2010). ¿Podemos proteger especies en riesgo en áreas protegidas? Un estudio de caso del género *Pinus* en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 875-882.
- Araújo, M., Pearson, R., Thuillers, W., & Erhard, M. (2005). Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*(11), 1504-1513.
- Arriaga, L., & Gómez, L. (2007). *Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2018, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/arriaga.html>
- Boot, T., Nix, H., Busby, J., & Hutchinson, M. (2014). BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. *A Journal of Conservation Biogeography*, 1–9.
- Candelario-Mejía, G., Rodríguez-Rivas, A., Muñoz-Urias, A., Ibarra-Montoya, J. L., Chavéz-López, C., Mosso-González, C., . . . Ramírez-García, S. A. (2015). Estudio ecológico mixto en México de la distribución de *Aedes aegypti*. Implicaciones en las políticas públicas. *Revista Médica*, 7(1), 13-19.
- CONABIO. (2008). *Nichos y Áreas de distribución*. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <http://nicho.conabio.gob.mx/home/proposito-y-guia-del-usuario>
- Correia, M. J. (2018). Criterios confiables para la construcción del modelo de Máxima Entropía (MaxEnt) orientados a la pesquería con red de cerco en el pacífico oriental. Primera Parte. *COFA*, 13-17.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & López-Sandoval, J. (2016). Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2(21), 135-148.
- Cruz-Cárdenas, G., Villaseñor, J. L., & López-Mata, L. (2014). Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies de MaxEnt. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2), 187-201.

- Díaz-Castillo, K. V. (2019). *Efecto del cambio climático sobre la distribución de Pinus montezumae y su consecuencia en la captación de agua y CO2 en el estado de Tlaxcala*.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. (2010). The art modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1, 330-342.
- FAO-CONAFOR. (2011). *Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. Informe Final del proyecto TCP/MEX/3301/MEX*. México.
- García Martínez, M. F. (2013). *Patrones de distribución de Pinus hartwegii, como posible estrategia de adaptación al cambio climático en el Parque Nacional Nevado de Toluca*. Toluca, México.
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). 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., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). VERY HIGH RESOLUTION INTERPOLATED CLIMATE SURFACES FOR. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 1965-1978.
- Hutchinson, G. (1957). Concluding remarks. . *Cold Spring Harbour Symposia on Quantitative Biology* 22, (págs. 415–427).
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala*. México.
- INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el Octubre de 15 de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=08>
- IPCC. (2007). Cambio Climático 2007. Informe de síntesis, del grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo.
- IPCC. (2018). Grupo intergubernamental de cambio climático.
- Jori, G. (2009). El cambio climático como problema y el diálogo social como solución. *Investigaciones geográficas*(48), 125-160.
- Li, G., Du, S., & Guo, K. (2015). Evaluation of Limiting Climatic Factors and Simulation of a Climatically Suitable Habitat for Chinese Sea Buckthorn. *PLoS ONE*, 10(7).

- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), 1-16.
- Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Skea, J., Pirani, A., Pidcock, R., Chen, Y., . . . Waterfield, T. (2019). *Calentamiento global de 1.5°C. Resumen para responsables de políticas* (Primera ed.). IPCC.
- Miguel-Álvarez, Ángel, J., & Pilar-Olave, R. (2002). Avances recientes en métodos bootstrap para procesos ARCH. Una aplicación en el mercado español de valores. *Estudios de Economía Aplicada*, 20(2), 487-498.
- Mohsen B., M., Cousens, R., & Webber, B. (2014). Here be dragons: a tool for quantifying novelty due to covariate range and correlation change when projecting species distribution models. *A Journal of Conservation Biogeography*, 1147–1159.
- Muñoz-Reja, L. M. (2018). Elaboración de un modelo predictivo de distribución potencial del cultivo *Chenopodium quinoa* Willd. Basado en necesidades edafoclimáticas con objeto de determinar las zonas de correcta adaptación en extremadura. *Universidad de Extremadura. Escuela de Ingenierías Agrarias*. Badajoz, España.
- Musálem-Santiago, M. A., & Solís-Pérez, M. A. (2000). *Monografía de Pinus hartwegii* (Primera ed.). México: INIFAP.
- NOAA. (5 de 1 de 2020). *Climate Model: Temperature Change (RCP 2.6) - 2006 - 2100*. Obtenido de sos.noaa.gov: <https://sos.noaa.gov/datasets/climate-model-temperature-change-rcp-26-2006-2100/>
- OMM. (12 de Enero de 2020). *Preguntas frecuentes-clima*. Obtenido de Organización meteorológica mundial: <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- Phillips, S. (2015). *Una breve guía didáctica sobre MaxEnt*. AT&T.
- Sáenz-Romero, C. (2014). *Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático* (Primera ed.). México: CONAFOR.
- SEMARNAT, C. M. (2014). *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2019, de Ficha de identificación. *Pinus hartwegii*:

http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/fichas_de_especies/Pinus_harwegii.pdf

Tivo-Fernández, Y. (2004). *Evaluación del polen de la población de Pinus hartwegii Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México*. Veracruz, México.

Varela, S., Terribile, L. C., De Oliveira, G., Diniz-Filho, J. A., González-Hernández, J., & Lima-Ribeiro, M. S. (2015). ecoClimate vs. Worldclim: variables climáticas SIG para trabajar en biogeografía. *Ecosistemas*, 24(3), 88-92.

Woodward, F. (1987). *Climate and plant distribution*. Cambridge: Cambridge University Press.

WorldClim. (2016). *WorldClim- Global Climate Data*. Recuperado el 25 de Junio de 2019, de <http://worldclim.org/>

WorldClim. (1 de 1 de 2020). Obtenido de WorldClim - Global Climate Data: <https://www.worldclim.org/methods1>