

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



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN
BOSQUES DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et Cham. EN EL
ESTADO DE TLAXCALA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA:

PATRICIA SOSA ROMANO

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

Dr. Hipólito Muñoz Nava

Dr. Saturnino Orozco Flores

TUTORES:

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Dra. Maricela Hernández Vázquez





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

Código: 505-RGE-04
 Publicación: Mayo 2016
 Revisión: 01
 9001:2015

PATRICIA SOSA ROMANO
CANDIDATO A MCSA
P R E S E N T E

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de titulación ha revisado el trabajo de investigación titulado: **"Evaluación del impacto del cambio climático en bosques de *Abies religiosa* (Kunth) Schdtl. et Cham. en el estado de Tlaxcala"**, realizado bajo la dirección del Dr. Saturnino Orozco Flores y del Dr. Hipólito Muñoz Nava. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

- Dr. José Luis Martínez y Pérez
- Dra. Maricela Hernández Vázquez
- Dr. Tomás Morales Acoltzi
- Dr. Hipólito Muñoz Nava
- Dr. Saturnino Orozco Flores
- Dr. Héctor Santos Luna Zendejas
- Dr. Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"
 Ixtacuixtla, Tlax., 22 de enero de 2018

(Handwritten signature of Patricia Limón Huitrón)

MSP. Patricia Limón Huitrón
COORDINADORA DE LA MCSA



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN
 EN GENÉTICA Y AMBIENTE
 MAESTRÍA EN CIENCIAS
 EN SISTEMAS DEL AMBIENTE**

c.c.p. Expediente



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**) por su apoyo en mis estudios de Maestría durante el periodo Julio 2015-Julio 2017.

Al Centro de Investigación en Genética y Ambiente (**CIGyA**) por su valiosa colaboración en mi Desarrollo Académico y por la oportunidad que me brindaron para poder realizar mis estudios de maestría.

A mis directores de tesis Dr. Hipólito Muñoz Nava y Dr. Saturnino Orozco Flores por sus aportaciones, sugerencias y apoyo durante la realización de esta tesis.

A los asesores Dra. Maricela Hernández Vázquez por su colaboración y aportación, a trabajo, al Dr. Tomás Morales Acoltzi investigador del CCA, UNAM, por sus valiosas aportaciones, observaciones, comentarios y apoyo en este trabajo.

A los miembros sinodales Dr. Oscar Vázquez, Dr. José Luis Martínez y al Dr. Héctor Luna por todos sus comentarios y aportaciones que ayudaron a enriquecer y mejorar este trabajo.

A mis amigos y compañeros de generación por todos los momentos compartidos durante la maestría.

Al Mtro. Rogelio Bernal Morales por su asesoría en el uso de RCLimDex, por sus consejos y comentarios.

A Elías Chamorro por su asesoría en el uso de Sistemas de Información Geográfica y por su amistad.

Al Dr. Vidal Guerra por su tiempo en la salida a campo.

A los todos los docentes del centro de investigación por todos sus conocimientos compartidos que de una u otra manera influyeron en mi formación académica.

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido terminar este trabajo.

A mis padres Hilario Sosa Carmona y Martha Romano Carmona por la confianza depositada en mí, por haberme permitido realizar los estudios de maestría y por motivarme a seguir mejorando cada día.

A mis hermanos Maricela, Roció, Eriberto, Maribel y a mi sobrino Mateo, por su paciencia y por todo el apoyo incondicional que me han brindado.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA.....	II
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Clima.....	1
1.2 Cambio climático	2
1.3 Modelos de cambio climático	4
1.4 Escenarios de cambio climático.....	5
1.5 Afectación de los bosques ante el cambio climático.....	8
1.6 <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham.....	10
1.7 <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham. en el estado de Tlaxcala.....	11
1.8 Adaptación y mitigación	12
1.9 Zonificación ecológica.....	13
1.10 Sistemas de información geográfica.....	14
1.11 Modelos digitales de elevación	15
1.12 Cartas de Uso del Suelo y Vegetación	15
2. ANTECEDENTES	17
3. JUSTIFICACIÓN	20
4. OBJETIVOS	22
5. HIPÓTESIS	22

6. METODOLOGÍA.....	23
6.1 Área de estudio.....	23
6.2 Análisis de datos climatológicos	24
6.3 Espacios de riesgo	25
6.4 Zonificación ecológica de <i>Abies religiosa</i>	27
6.4.1 Modelo Digital de Elevación	28
6.4.2 Altitud	28
6.4.3 Pendiente	28
6.4.4 Edafología	29
6.4.5 Uso del Suelo y Vegetación	29
6.4.6 Datos de precipitación y temperatura.....	29
6.5 Zonificación del mapa base	30
6.6 Zonificación ecológica de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schldl. et Cham. considerando escenarios generados por modelos de cambio climático	32
6.6.1 Cálculo del Índice de aridez	32
6.6.2 Mapas de isotermas e isoyetas aplicando escenarios de cambio climático	34
7. RESULTADOS	35
7.1 RClimDex.....	35
7.1.1 Precipitación total anual	35
7.1.2 Precipitación máxima en un día	37
7.1.3 Días secos consecutivos.....	39
7.1.4 Días húmedos consecutivos	40
7.1.5 Temperatura máxima extrema	42
7.1.6 Temperatura mínima extrema	44
7.1.7 Días de heladas	45

7.1.8 Días de verano	47
7.2 Espacios de riesgo	48
7.2.1 Espacios de riesgo de la estación de Calpulalpan	49
7.2.1 Espacios de riesgo de la estación de Huamantla.....	49
7.2.3 Espacios de riesgo de la estación de Terrenate	50
7.2.4 Espacios de riesgo de la estación de Tlaxco	51
7.2.5 Espacios de riesgo de la estación de Zitlaltepec.....	52
7.3 Zonificación de distribución potencial	53
7.3.1 Zonificación de la distribución potencial actual de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham.....	58
7.3.2 Zonificación de la distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham. aplicando el escenario RCP4.5, año 2030.....	59
7.3.3 Zonificación de la distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham. aplicando el escenario RCP6.0, año 2030.....	61
7.3.4 Zonificación de la distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham. aplicando escenario 4.5, año 2060	63
7.3.5 Zonificación de la distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham. aplicando el escenario RCP6.0, año 2060.....	64
8. DISCUSIÓN	68
9. CONCLUSIONES.....	71
10. LITERATURA CITADA.....	73
11. ANEXO I.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración de GEI....	8
Tabla II. Información de las estaciones utilizadas en este estudio.....	25
Tabla III. Matriz de requerimientos ecológicos de Abies religiosa (Kunth) Schltl. et Cham.....	31
Tabla IV. Índices analizados de RClimDex	35
Tabla V. Anomalías de precipitación y temperatura para el periodo base con una y dos desviaciones estándar	52
Tabla VI Anomalías de precipitación y temperatura para el periodo actual con una y dos desviaciones estándar	53
Tabla VII. Superficie en hectáreas de niveles de aptitud en el estado de Tlaxcala bajo escenarios de cambio climático.....	66
Tabla VIII. Porcentaje de cambio de los escenarios de cambio climático respecto al escenario base	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cambio de la temperatura global respecto a los escenarios de RCP (IPCC, 2014).....	7
Figura 2. Localización del área de estudio	23
Figura 3. Estaciones climatológicas que se encuentran operando en el estado de Tlaxcala.....	25
Figura 4. Precipitación total anual en los días húmedos cuando es ≥ 1 (mm)	37
Figura 5. Precipitación máxima mensual en un día (mm).....	38
Figura 6. Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es < 1 mm	40
Figura 7. Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es ≥ 1 mm	42
Figura 8. Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria.....	43
Figura 9. Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	45
Figura 10. Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) es $< 0^{\circ}\text{C}$	46
Figura 11. Número de días en un año cuando es $> 25^{\circ}\text{C}$	48
Figura 12. Espacios de riesgo para Calpulalpan: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2013).	49
Figura 13. Espacios de riesgo para Huamantla: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014).....	50
Figura 14. Espacios de riesgo para Terrenate: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2013).	51
Figura 15. Espacios de riesgo para Tlaxco: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014).	51
Figura 16. Espacios de riesgo para Zitlaltepec: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014).	52
Figura 17. Mapa de altitud del estado de Tlaxcala con clasificación cada 100 metros.	54
Figura 18. Mapa de pendientes para el estado de Tlaxcala, clasificado en porcentaje.....	55

Figura 19. Mapa de tipos de suelo en el estado de Tlaxcala.....	56
Figura 20. Mapa de Uso de suelo y vegetación en el estado de Tlaxcala.....	57
Figura 21. Mapa de distribución potencial de <i>A. religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. para el escenario base	58
Figura 22. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el mapa base	59
Figura 23. Mapas de distribución potencial de <i>A. religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. bajo el escenario RCP4.5, modelo HadGEM2ES, para el año 2030.....	60
Figura 24. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP 4.5, para el año 2030.....	60
Figura 25. Mapas de distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. bajo el escenario RCP6.0, modelo HadGEM2ES, para el año 2030	62
Figura 26. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP6.0, año 2030.....	62
Figura 27. Mapas de distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. bajo el escenario RCP4.5, modelo HadGEM2ES, para el año 2060	63
Figura 28. Mapa de isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP4.5, año 2060	64
Figura 29. Mapas de distribución potencial de <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham. bajo el escenario RCP6.0, modelo HadGEM2ES, para el año 2060	65
Figura 30. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RC6.0, año 2060	65

RESUMEN

El análisis de la variabilidad climática y su impacto sobre la vegetación, es de gran importancia para establecer medidas de mitigación ante el cambio climático como, disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, reforestación o conservación de los bosques; y adaptación como: la integración de programas de manejo bajo el enfoque de protección del hábitat bajo contexto de cambio climático. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), predice fluctuaciones en la precipitación y temperatura asociadas a EL NIÑO Oscilación del Sur (ENSO), éstas pueden afectar al bosque y sus componentes florísticos, debido a que rebasan el umbral de confort de los requerimientos ecológicos de la vegetación, como *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. El objetivo del presenta trabajo fue evaluar el posible impacto positivo o negativo del cambio climático en *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. en el estado de Tlaxcala, por lo cual se analizó la variabilidad climática extrema y su impacto en esta especie forestal. Se analizaron series de tiempo diarias de temperatura máxima y precipitación de cinco estaciones climatológicas (Calpulalpan, Huamantla, Terrenate, Tlaxco y Zitlaltepec), en el estado de Tlaxcala, mediante el software RClimdex y desde la perspectiva de espacios de riesgo para dos períodos: 1961-1990 (período base) y 1991-2015 (periodo reciente). Se realizó una zonificación actual y futura de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. de acuerdo a sus requerimientos ecológicos. Mediante sobreposición de mapas digitales de isoyetas, isotermas, edáficas, elevación y uso del suelo y vegetación, se determinaron niveles de aptitud de esta especie arbórea. Se aplicaron los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 6.0 en el modelo HadGEM2ES para los años 2030 y 2060. Empleando ocho índices del Software RClimDex, los resultados indican una modificación en el clima, mostrando un aumento de temperatura en años recientes. Los espacios de riesgo mostraron para algunas estaciones cambios en las anomalías de temperatura y precipitación, mostrando en el periodo actual una señal de cambio climático, incrementando el riesgo asociado a la temperatura y precipitación extremas. La zonificación aplicando ambos escenarios de cambio climático muestra una disminución de la superficie

óptima para el desarrollo de la especie para el 2030 y el 2060 en comparación con el escenario base. Sin embargo, para el 2060 se obtuvo una superficie mayor en comparación con el año 2060. Lo que indica que hay una reducción de más de la mitad de la superficie respecto al escenario base. Debido a esto, es importante establecer estrategias de mitigación que maximicen la reducción de gases de efecto invernadero, así como iniciar con medidas de adaptación forestal bajo el enfoque de cambio climático.

ABSTRACT

The analysis of climate variability and its impact on vegetation is of great importance to establish mitigation measures in the face of climate change, such as reducing the emission of greenhouse gases, reforestation or conservation of forests; and adaptation as: the integration of management programs under the habitat protection approach in the context of climate change. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), predicts fluctuations in precipitation and temperature associated with EL NIÑO-Southern Oscillation (ENSO), these can affect the forest and its floristic components, because they exceed the threshold the comfort of ecological requirements of vegetation, such as *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. The objective of this paper was to evaluate the possible positive or negative impact of climate change on *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. in the state of Tlaxcala, for which extreme climatic variability and its impact on this forest species were analyzed. Daily time series of maximum temperature and precipitation were analyzed from five climatological stations (Calpulalpan, Huamantla, Terrenate, Tlaxco and Zitlaltepec), in the state of Tlaxcala, using the RClimDex software and from the perspective of climatic threat spaces for two periods: 1961 -1990 (base period) and 1991-2015 (recent period). A current and future *Abies religiosa* (Kunth) Schltld et Cham. zoning was made according to your ecological requirements. By means of superposition of maps of isohyets, isotherms, edaphic, elevation and use of soil and vegetation, levels of aptitude of this arboreal species were determined. The climate change scenarios RCP 4.5 and 6.0 were applied in the HadGEM2ES model for the years 2030 and 2060. Using eight RClimDex Software indices, the results indicate a modification in the climate, showing an increase in temperature in recent years. The climatic threat spaces showed for some seasons changes in temperature and precipitation anomalies, showing in the current period a signal of climate change, increasing the risk associated with extreme temperature and precipitation. Zoning using both climate change scenarios shows a decrease in the optimal area for the development of the species for 2030 and 2060 compared to the baseline scenario. However, by 2060 a larger surface area was obtained compared

to the year 2060. This indicates that there is a reduction of more than half of the area with respect to the base scenario. Due to this, it is important to establish mitigation strategies that maximize the reduction of greenhouse gases, as well as initiate with measures of forest adaptation under the climate change approach.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Clima

Magaña (2004) define clima como, un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. Para hablar del clima en un lugar se tiene que contar por lo menos con 30 años de datos/observaciones de esa región, de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Sin embargo, en los últimos años se han presentado eventos climáticos que contribuyen a que parámetros meteorológicos como la precipitación o la temperatura salgan de su valor medio, dando lugar a las anomalías climáticas, ocasionadas por forzamientos internos como, inestabilidad en la atmósfera y océanos; o forzamientos externos, como cambios en las características del planeta (Magaña, 2004).

Al hablar de clima y tiempo suelen confundirse los términos, por lo cual cabe mencionar la diferencia entre éstos; el tiempo es determinista y el clima es probabilista (Magaña, 2010). En palabras simples de acuerdo con Conde (2006), clima es lo que esperas y estado del tiempo es lo que recibes. Cada día hay variaciones diarias en el planeta, por lo que cada día hay variaciones en las condiciones de temperatura y precipitación, a esto se le llama estado del tiempo (Conde, 2006). Existen cambios que se presentan en la atmósfera que dan lugar a la variabilidad del clima, de las cuales son muchas las formas de esta, debido a esto pronosticar no es fácil (Magaña, 2004).

Picazo *et al.* (2015) mencionaron que suele denominarse variabilidad climática a la variabilidad a pequeña escala, de algunas décadas o menos; en tanto cambio climático se refiere a la variabilidad a una escala cronológica mayor que la de unas pocas décadas. Muchos son los causantes de estos cambios en el clima como, la excesiva generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la acelerada pérdida de bosques debido a la deforestación que en consecuencia da como resultado la disminución de la capacidad para remover GEI de la atmósfera, produciendo así un cambio en el clima (CONAFOR, 2013a).

1.2 Cambio climático

Hoy en día, uno de los temas de mayor interés es el cambio climático; éste definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), como “un cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. Cabe mencionar que, aunque, el clima cambia naturalmente, hay registros que evidencian un calentamiento del planeta durante los últimos 50 años y que se le atribuye a las actividades antrópicas como la causa dominante del calentamiento global observado (IPCC, 2014), a la quema de combustibles fósiles, agricultura, descomposición de residuos, tala inmoderada de árboles. El IPCC es un grupo dedicado al análisis de la información científica, técnica y socioeconómica, necesaria para entender los elementos de riesgo que supone el cambio climático, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y mitigación para éste. Observaciones efectuadas en los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, en particular por el aumento de temperatura (Magaña, 2010). Algunas de las consecuencias de cambio climático son: deshielos en las zonas glaciares, cambios en el nivel del mar; se estima que en el siglo XX hubo un aumento de 17 centímetros a nivel mundial. También se están presentando con más frecuencia los eventos extremos; estos son aquellos fenómenos climáticos, de gran intensidad y poca frecuencia, que tiene efectos ambientales y sociales adversos, ya sea regional o localmente; por ejemplo, huracanes, tornados, sequias, heladas o granizadas (SEMARNAT, 2009).

El clima ha sido muy cambiante en el pasado debido a cambios naturales, sin embargo, a partir de la Revolución Industrial, la composición de la atmósfera se ha modificado, asociado principalmente a actividades antrópicas básicamente por quema de combustibles fósiles, generando los GEI. Éstos se encuentran en la atmósfera y son: dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3), perfluorocarbonos (PFCs), hidrofluorocarbonos

(HFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆), y son aquellos que tienen la propiedad de retener la energía que la superficie terrestre (CONAFOR, 2013a).

De acuerdo al IPCC (2014), el aumento promedio de la temperatura de la superficie terrestre desde mediados del siglo XIX ha sido de 0.85 °C en muchas partes del mundo incluyendo América Latina y el clima seguirá cambiando hasta mediados de este siglo, independientemente de las medidas que se adopten para reducir las emisiones. El IPCC realizó escenarios climáticos, llamados Trayectorias Representativas de Concentración (RCP), los cuales indican aumentos en la temperatura, por ejemplo; para el año 2100, de acuerdo a los escenarios de precipitación se presentan variaciones en distintas zonas geográficas. Estos cambios en las variables ambientales pueden provocar modificaciones en el ciclo hidrológico, en la humedad atmosférica, afectaciones en la vegetación, también puede provocar estrés de sequía forestal, cambios en la dinámica de ésta, ya que el clima es uno de los factores que delimitan la distribución de las plantas, pues requieren de ciertas condiciones de humedad, luz, temperatura para desarrollarse y reproducirse (Gutiérrez y Trejo, 2014; Sáenz, 2015).

El PEACC (2014), en el Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (IEEGEI) 2005-2009, en Tlaxcala en el 2009 las emisiones en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) fueron de 3,593.3 Gg. La contribución por categorías en términos de CO₂ eq para energía fue de 68.7% (2,468.7 Gg); desechos 14.4% (516.5 Gg), agricultura 9.3% (335.1 Gg), uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura 6.5% (233.0 Gg) y procesos industriales 1.1% (40.0 Gg).

El PEACC (2014), mencionó que cada una de las tres últimas décadas ha sido sucesivamente más caliente en la superficie de la tierra que cualquier década anterior desde 1985. En Tlaxcala se han presentado eventos hidrometeorológicos extremos y se ha notado un incremento en la frecuencia de éstos como lo son granizadas, heladas atípicas, sequías y tormentas.

1.3 Modelos de cambio climático

Los modelos de circulación general de la atmósfera se han utilizado para estudiar la variabilidad y cambio climático. En el estudio de cambio climático mediante los forzantes radiativos se realizan simulaciones numéricas donde se aumentan gradualmente las concentraciones de GEI, en los cuales la mayoría de los modelos sugieren que a mayor concentración de GEI, mayor será la magnitud de la anomalía climática (Magaña, 2004).

Los modelos climáticos simulan la dinámica atmosférica global y estiman los posibles cambios del clima en las décadas futuras, también simulan las complejas interacciones entre los componentes de un ecosistema global y su interacción con los procesos físicos, biológicos y químicos que suceden a su interior. De estos modelos se generan varios escenarios de cambio climático que consiguen representar lo que sucedería si ciertas condiciones y tendencias se mantienen o son modificadas, debido a cambios en las emisiones de GEI (Conde *et al.*, 2016; Romero, 2016). Con la modelación climática mediante los escenarios se pueden determinar los efectos que el cambio climático tendrá en diferentes regiones del planeta, así como inferir los efectos en las poblaciones naturales. Resultados de las investigaciones mediante la modelación climática y generación de escenarios futuros, son necesarios para determinar qué ecosistemas son los más vulnerables, cuáles serían los que se adaptarían a las nuevas condiciones ambientales; así como las medidas de acción y mitigación para enfrentar el cambio climático (Romero, 2016).

Las bases físico-matemáticas de los modelos de circulación general están fundamentadas en la dinámica atmosférica a diferentes escalas, termodinámica de los procesos de interacción océano atmósfera, física de nubes, balances de radiación en onda corta y larga. Por otro lado, otro componente importante es el tipo de solución numérica y su resolución espacial; en consecuencia los pasos de tiempo, la relación entre la resolución espacial y temporal están relacionados por un criterio de estabilidad numérica.

Existen diferentes modelos de circulación general, a continuación se mencionan los que contiene la página de la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés): *Canadian Center for Climate Modeling and Analysis (CGCM3)*, *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDLCM21)*, *Hadley Center (HADCM3)*, The Community Earth System Model (CCSM4), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDLCM3), Hadley Centre Global Environmental Model version 2 (HadGEM2ES), Community Earth System Model (CESM1BGC), METEO France (CNRMCM5), An ensemble of 17 CMIP5 model predictions (Ensemble). Se mencionan los modelos de la USDA debido a que el modelo utilizado en este trabajo se obtuvo de esta página y se trabajó con el modelo HadGEM2ES.

El modelo HadGEM2ES es una configuración de la familia de HadGEM, el HadGEM2 significa la versión 2 del Hadley Center Global Environment Model, y ha sido diseñada con el propósito específico de simular y comprender la evolución de la escala del centenario del clima incluyendo retroalimentación biogeoquímica. El modelo del sistema HadGEM2 de la Tierra (HadGEM2-ES) comprende la atmósfera física subyacente y los componentes del océano con la adición de esquemas para caracterizar aspectos del sistema de la Tierra. Los componentes particulares del sistema de la Tierra que se han agregado para crear el modelo de sistema terrestre HadGEM2. El componente atmosférico utiliza una resolución horizontal de $1.25^\circ \times 1.875^\circ$ en latitud y longitud con 38 capas en la vertical que se extiende a más de 39 km de altura. El desarrollo de HadGEM2 ha producido un modelo de sistema de la Tierra que está demostrando ser una herramienta de ciencia útil para predecir el clima futuro y comprender las reacciones climáticas dentro del sistema de la Tierra (Collins *et al.*, 2011).

1.4 Escenarios de cambio climático

México en su participación en la CMNUCC, asumió el compromiso de estimar e informar el efecto de los Gases de Efecto Invernadero, y ha cumplido este compromiso mediante la realización de Inventarios Estatales de Emisiones de

Gases de Efecto Invernadero (IEEGEI). Estos inventarios disminuyen la incertidumbre de la cantidad emitida de estos gases en periodos actuales (PEACC, 2014). Sin embargo, se desconoce cuánto de estos gases se emitirán en un futuro hacia la atmósfera, existe un nivel de incertidumbre asociada con las estimaciones climáticas (Sáenz, 2014). Como se sabe, los GEI son el principal factor que contribuye al cambio climático. Los resultados del IEEGEI de Tlaxcala durante el periodo 2005-2009 indican incrementos en las emisiones de GEI de aproximadamente 4.9% (PEACC, 2014).

Debido a esto es de vital importancia conocer el comportamiento del clima en un futuro, por lo cual, el uso de escenarios climáticos ayudará a tener una representación del clima futuro, para estimar los efectos del cambio climático.

Los escenarios de cambio climático están basados en simular el clima bajo las condiciones de cambio en la concentración de dióxido de carbono, principalmente. Los escenarios de cambio climático son importantes, para poder identificar y proponer medidas de adaptación ante un incremento/disminución en las temperaturas, así como en la precipitación. Los escenarios comprenden una línea de cambio similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas, de cambio tecnológico (PEACC, 2014), mediante la cual se realiza una representación simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas; no son pronósticos climáticos, estos escenarios son proyecciones climáticas bajo diferentes escenarios de forzamiento radiativo, llamadas Trayectorias Representativas de Concentración (RCP por sus siglas en inglés) (Fernández *et al.*, 2015).

Los RCP están destinados a apoyar investigación científica para examinar varios futuros del cambio climático y sus implicaciones para adaptación y mitigación. Estos escenarios incluyen los escenarios de estabilización mitigación y emisiones de referencia, las emisiones de otros gases y aerosoles radiactivamente activos, uso de la tierra y condiciones socioeconómicas. Los RCP se han seleccionado

principalmente en función de sus emisiones, los resultados de concentración asociados y el forzamiento radiativo neto (Moss *et al.*, 2008)

La palabra “representativa” significa que cada RCP, los escenarios posibles que darían lugar a las características específicas del forzamiento. “Trayectoria” representa la trayectoria en el tiempo para alcanzar ese resultado (IPCC, 2014).

Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP2.6 para emisiones bajas, supone una reducción considerable y sostenida en las emisiones de gases de efecto invernadero, RCP4.5 y RCP6.0 suponen una cierta estabilización de las emisiones, RCP8.5 para emisiones altas, éste supone la continuidad de las tasas de emisiones altas (IPCC, 2014) los cuales son expresadas en W/m^2 que se refieren a la radiación global de energía (Conde *et al.*, 2016), éstos son los últimos escenarios presentados en el *Quinto Informe de Evaluación* del IPCC. Los escenarios muestran el resultado de los diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero desde la actualidad hasta el 2100 (figura 1), los tipos de escenarios se muestran en la tabla I.

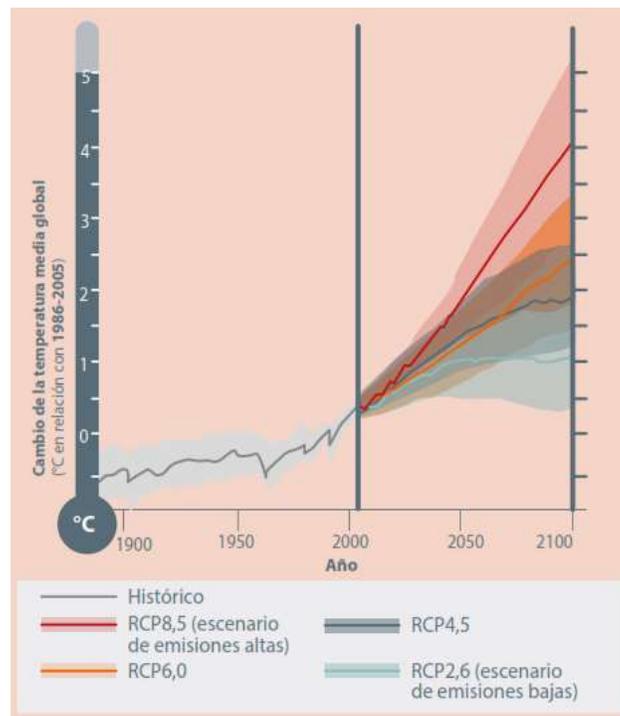


Figura 1. Cambio de la temperatura global respecto a los escenarios de RCP (IPCC, 2014).

Tabla I. Escenarios de Trayectorias Representativas de Concentración de GEI

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración	Trayectoria
RCP8.5	>8.5 W/m ² en 2100	>~1,370 CO _{2eq} en 2100	Aumentando
RCP6.0	~6 W/m ² estable después de 2100	~850 CO _{2eq} (estable después de 2100)	Estable sin pararse
RCP4.5	~4.5 W/m ² estable después de 2100	~650 CO _{2eq} (estable después de 2100)	Estable sin pararse
RCP2.6	Pico en ~3 W/m ² antes del 2100 y después disminuye	Pico en ~490 CO _{2eq} antes del 2100 y después disminuye	Aumenta y posteriormente disminuye

Fuente: Moss *et al.* (2008)

Las tendencias proyectadas para la temperatura en América Latina para el 2100 para los escenarios RCP4.5 y 8.5 es un calentamiento de +1.6 °C a +4 °C y en un escenarios RCP4.5 un aumento de +1 °C a +1.5 °C. Para la precipitación se proyectan aumentos y disminuciones de ésta. En América Central la precipitación anual oscila entre -22% y el +7% para el 2100 (IPCC, 2014).

1.5 Afectación de los bosques ante el cambio climático

El clima es uno de los factores que delimitan la distribución de plantas, ya que requieren de ciertas condiciones de temperatura, humedad y luz para desarrollarse y producirse, cuando los factores climáticos son adecuados, los ecosistemas tienen un ciclo normal (Gutiérrez y Trejo, 2014); sin embargo, cuando se da una variación en el clima, la vegetación se altera. Asimismo Gutiérrez y Trejo (2014), indican que conocer la relación entre las condiciones climáticas, las afinidades y patrones de comportamiento de las especies, pueden tener repercusiones prácticas importantes, esencialmente en el manejo y conservación de los recursos vegetales.

Algunos de los efectos que se esperan con el cambio climático sobre las especies forestales es que sufran estrés hídrico, que se presente una mayor incidencia de plagas y enfermedades (CONAFOR, 2013a). También algunos de los impactos en la vegetación es que afecta a muchas especies en sus procesos estacionales como

son la floración de las plantas, las migraciones de las aves y la aparición de las primeras hojas de los árboles en la primavera. Como respuesta a los cambios en algunas variables ambientales, los organismos de ciertas especies se han desplazado hacia nuevos sitios con características ambientales similares a las que poseía su hábitat natural. Además es importante conocer las condiciones actuales en las que se distribuyen las especies, ya que brinda información importante para identificar espacialmente las áreas que contienen las características ambientales que requieren, debido a la estrecha relación entre los bosques y el clima implica que un cambio drástico en uno influirá en el otro, ésta repercusión podría ser negativa en algunas situaciones y positivas en otras (FAO, 2013).

Existe gran diversidad de estudios que muestran evidencias de la existencia del cambio climático. Cabe mencionar que estos cambios en los patrones de distribución de la precipitación y de temperatura afectan a especies; ya que reduce la capacidad de éstas para adaptarse a nuevas condiciones ambientales, debido a que se requieren de cientos de años para aclimatarse, llegando a modificar su distribución, creando un potencial de desplazamiento hacia lugares donde se encuentren las condiciones ambientales requeridas para su supervivencia. Los bosques de clima templado frío y semicálidos son los tipos de vegetación más sensibles al cambio climático y tenderían a desaparecer al aumentar la temperatura (Villers y Trejo, 2000).

Uno de los eventos que provoca afectación a los bosques debido al cambio climático son los incendios forestales, ejemplo de ello es el año 1998. Debido a la presencia del fenómeno de El NIÑO, se presentaron 441 incendios y 1964 ha afectadas, el promedio anual de incendios en el Parque Nacional La Malinche es de 126 y un aproximado de 312 ha siniestradas por año. El número de incendios registrados para esta serie de datos puede variar desde 116 en los años 1999 y 2007, hasta 516 en el 2000. En La Malinche en 14 años se han registrado un total de 2 076 incendios que han afectado una superficie de 6,016 ha. La mayoría de los incendios se presentaron entre los 2,600 y los 3,000 msnm (Villers *et al.*, 2009).

1.6 *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et Cham.

Los bosques de *A. religiosa*, conocido comúnmente como oyamel, tienen importancia ecológica, biológica, económica, ya que de la madera de éstos se obtiene celulosa, también su madera se emplea como combustible y para la construcción. El uso más importante es como “árbol de navidad”, sus ramas se utilizan para hacer adornos en ceremonias religiosas, la madera se recomienda para fabricar papel, ya que la pulpa es de muy buena calidad, se puede utilizar en la fabricación de cajas, puertas, marcos y techos interiores, fabricación de postes para soporte de cableado que transmite energía eléctrica, cercas, durmientes y palos para escoba. También es recomendado para uso medicinal, debido a la trementina que exuda la especie; la corteza de árboles viejos es utilizada para carbón (CONAFOR, 2003). Otra de su importancia radica en la belleza paisajística, debido a que los bosques de oyamel son un atractivo para los excursionistas y estos lugares se utilizan como zonas de recreo por algunas personas y estos bosques se encuentran entre los más ricos en lo que a micoflora concierne (Rzedowski, 2006).

El bosque de oyamel se distribuye a lo largo de las Sierras Madre Occidental y Oriental, en el Eje Neovolcánico Transversal, la Sierra Norte de Oaxaca y en el Sur de Chiapas. Éste es nativo de las montañas centrales y del sur de México, oeste de Guatemala. Los bosques de coníferas se desarrollan en zonas montañosas y con clima templado a frío, el oyamel se localiza principalmente en los estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Guerrero, Tlaxcala, Distrito Federal y Estado de México. En México, se localiza entre los 2 400 y 3 600 msnm, están confinados a cañadas o barrancas que ofrecen el microclima adecuado. Éste bosque requiere condiciones de humedad elevada, con una precipitación media anual superior a los 1 000 mm distribuida en 100 o más días con lluvia. La temperatura media anual varía de 7 a 15 °C, con una máxima de hasta 20 °C y raramente se presentan temperaturas mínimas extremas de hasta -12 °C. El promedio anual de días con helada es generalmente superior a 60 y éstas pueden presentarse de septiembre a marzo a niveles inferiores y en cualquier mes del año por arriba de los 3 000 msnm (Rzedowski, 2006). La altura de estos árboles es de

20 y 40 m (Rzedowski, 1994) y diámetro normal hasta de 1.80 m con hojas perennifolias. Sus flores son estructuras reproductivas masculinas y femeninas que se presentan desde diciembre, su fructificación aparece de noviembre a enero, la dispersión de las semillas ocurre entre marzo y abril.

1.7 *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. en el estado de Tlaxcala

Los bosques del estado de Tlaxcala como el de pino, oyamel, encino y sabino que son propias de climas fríos y templados, que son especies resistentes a las bajas temperaturas (PEACC, 2014).

En el estado, *Pinus montezumae*, *Pinus hartwegii*, *Pinus pseudostrobus*, *Abies religiosa*, son las especies de coníferas con mayor distribución en el volcán La Malinche. En este Parque Nacional, esta especie se desarrolla entre los 2 900 y 3 700 msnm, se encuentra principalmente sobre cañadas, barrancos y pendientes, donde es protegida de los fuertes vientos y de insolación intensa. El Parque Nacional La Malinche se encuentra bajo la jurisdicción de 12 municipios del estado de Tlaxcala, de los cuales Huamantla, Teolocholco, Tepatlaxco, San Francisco Tetlanohcan, y Zitlaltepec son los municipios con mayor superficie con vegetación dentro del Parque, siendo el 82.2% de la vegetación forestal, también 4 municipios del estado de Puebla conforma La Malinche (Villers *et al.*, 2009).

La importancia de conservar los bosques de La Malinche, además de estar catalogado como Parque Nacional por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONAFOR, 2003), es una fuente importante para el abastecimiento de agua para las regiones aledañas de Puebla y Tlaxcala. También radica su importancia por su valor histórico y cultural, además de su belleza natural, tiene funciones de recreación y protección, importancia económica para la población del lugar. Los bosques de *A. religiosa* presenta una variedad micro climática importante para el desarrollo de una diversidad de especies importantes (CONAFOR 2003). El bosque de oyamel también se encuentra en los municipios de Tlaxco, Terrenate, Nanacamilpa. Este último es zona de hábitat de las luciérnagas, una especie

endémica del lugar. Este municipio tiene una zona boscosa de 3 mil 121.39 hectáreas compuesta por bosques de oyamel, encino y pino se caracteriza por su clima templado y húmedo, a una altura de 2 800 msnm, ecosistema característico para el “Santuario de las Luciérnagas”, donde se cuida, protege y preserva el patrimonio natural de esta región (CONAFOR, 2013b).

1.8 Adaptación y mitigación

Las medidas de adaptación y mitigación son las respuestas principales ante el cambio climático, la primera afronta sus impactos y la segunda se encarga de las causas del cambio climático (FAO, 2013).

El IPCC define adaptación como: “*el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos*” (IPCC, 2014). Algunas de las medidas de adaptación de acuerdo al PEACC (2014), para la conservación de la biodiversidad son: el incremento de hectáreas bajo el estatus de protección, la integración de programas de manejo bajo el enfoque de protección del hábitat ante un escenario de cambio climático. También la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, el fortalecimiento de los sumideros forestales de carbono y la sustitución de productos (FAO, 2013). El IPCC (2014), menciona que la adaptación es la única opción eficaz para enfrentar los impactos del cambio climático que la mitigación no puede reducir. Cruz *et al.* (2016), señalan que la reducción o el aumento de los rangos de distribución geográfica de las especies va a depender de su adaptabilidad al cambio climático. La adaptación se puede percibir como las acciones encaminadas para prevenir, restaurar y reducir los riesgos a causa del cambio climático (PEACC, 2014).

Se entiende por vulnerabilidad a la propensión o predisposición de ser afectado negativamente por las modificaciones en los patrones climáticos, dentro del concepto de vulnerabilidad se incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (Quintana, 2016).

La mitigación son las acciones que se realizan para reducir las emisiones que son liberadas a la atmósfera, mediante políticas y actividades en áreas destinadas a la agricultura, la ganadería, así como el fomento a la tecnología de energía renovable,

el mejoramiento y eficiencia del sistema de transporte público y privado, el manejo y aprovechamiento integral de residuos, la planeación de los asentamientos humanos de manera sustentable, el fomento de industrias social y ambientalmente responsables; darán la pauta a un desarrollo sustentable y que ayudaran a reducir el proceso del cambio climático (PEACC, 2014). Algunos mecanismos de mitigación ambiental son: Programa para la Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD+), Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), Estrategias de Desarrollo Basadas en Reducción de Emisiones, Estrategia Nacional de Cambio Climático. Proyecto de captura de carbono para compensar las emisiones generadas por la deforestación y degradación de bosques y vegetación (Economía del Cambio Climático, 2017).

Los cambios en las prácticas de manejo proyectadas para disminuir la vulnerabilidad de los bosques ante el cambio climático y las intervenciones destinadas a reducir la vulnerabilidad de las personas frente al cambio climático son algunas medidas de mitigación que abarca la adaptación (FAO, 2013).

1.9 Zonificación ecológica

Los estudios de zonificación son importantes para tomar decisiones en el ámbito de manejo integrado del territorio, tomando en cuenta sus aptitudes y características que lo definen. La zonificación se define como la sectorización de un territorio, para identificar unidades geográficas con características físicas y biológicas en relación con cierto potencial (Suárez, 2014). A continuación se presentan algunos de los tipos de zonificación:

La zonificación agrícola tiene como objetivo el estudio, análisis y delimitación de zonas homogéneas de los recursos físicos y socioeconómicos para lograr su mejor aprovechamiento en el sector agrícola, mediante reagrupamiento de pequeñas unidades locales con características parecidas (Lucero, 2013).

La zonificación agroecológica, es una zonificación agrícola en la que se toman en cuenta factores bioclimáticos, suelo, fisiografía y características bioclimáticas del

cultivo en estudio (Lucero, 2013). Asimismo, esta zonificación constituye una herramienta para dar respuesta a los problemas que suscitan cuando se realizan cambios en el uso de la tierra sin considerar sus aptitudes agroecológicas (Suárez, 2014).

García y Sierra (2014) definieron la zonificación ecológica como una *“clasificación de tierras en unidades más pequeñas, que comparten iguales o similares requerimientos ambientales más adecuados para el desarrollo (óptimo y en diferentes niveles) de alguna especie vegetal o animal”*.

1.10 Sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es un sistema que es utilizado para ingresar, almacenar, manipular, analizar y presentar todo tipo de información que pueda tener una referencia geográfica y obtener datos geoespaciales con el fin de brindar apoyo en la toma de decisiones sobre planificación y manejo de los recursos naturales, suelo, ambiente, transporte, entre otros (Puerta *et al.*, 2011).

Los SIG permiten visualizar y consultar mapas, además de realizar operaciones de análisis como superposiciones vectoriales o álgebra de mapas. Éstos pueden ser de dos tipos de formatos: raster (archivo de imagen) y vectorial (cobertura), según el método utilizado para modelar la realidad geográfica como los aspectos del territorio o del medio y que quedan representados gráficamente (Puerta, 2011; Mancebo, 2008).

ArcGIS es un sistema de información geográfica, con una interface gráfica de usuario, posibilita cargar datos espaciales y tabulares para ser mostrados en forma de mapas, tablas y gráficos, también provee las herramientas necesarias para consultar y analizar los datos y presentar los resultados como mapas con buena calidad (Puerta, 2011). ArcGis es un producto comercializado por ESRI (Environmental Systems Research Institute), cada versión de ArcGis incluye tres aplicaciones principales: ArcMap, Arc Catalog y ArcToolbox (Mancebo, 2008).

ArcMap es la aplicación central utilizada en el software ArcGIS, sus funciones principales son: visualización, creación de mapas, edición, selección de gráficas, diseño de mapas, así como operaciones de bases de datos como: consultas, informes, estadísticas, resúmenes, tablas, reportes, fotografías y otros elementos adicionales a los datos geográficos (Mancebo, 2008). La interfaz está compuesta por una tabla de contenidos en el cual se listan las capas que forman el mapa, una ventana donde se muestra el mapa, y barra de menús, barra de herramientas para trabajar con las capas y mapas, área de visualización del mapa (Puerta, 2011; Collado y Navarro, 2013). ArcMap representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en una vista de mapa

1.11 Modelos digitales de elevación

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, estos están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados, lo que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (INEGI, 2014). El término elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un Datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura (Fallas, 2007).

Algunos de los usos de los MDE se pueden aplicar para realizar estimaciones de volúmenes a remover o rellenar en trabajos de ingeniería, cartografía topográfica, mapeo y estudios batimétricos e hidrológicos, mapeo geológico y geofísico, simulación y análisis del paisaje, análisis estadístico del terreno, determinación de pendiente, aspecto y sombreado del terreno (Fallas, 2007).

1.12 Cartas de Uso del Suelo y Vegetación

La República Mexicana cuenta con una gran riqueza florística y de vegetación donde prácticamente existen la mayoría de las formaciones vegetales descritas a nivel mundial. Debido a esto es necesario conocer las diferentes agrupaciones vegetales así como su ubicación, por lo que la información de Uso del Suelo y

Vegetación es importante en cuanto a su conocimiento se refiere. Las cartas de Uso del Suelo y Vegetación Serie V, incluye los sistemas manejados por el hombre y que constituyen los usos del suelo a partir de la modificación de la cobertura vegetal: agrícola, pecuario, forestal y acuícola (INEGI, 2015).

La información de las cartas de Uso del Suelo y Vegetación de INEGI, está estructurada digitalmente para su uso y aplicación en SIG. Estas cartas indican la distribución de los tipos de vegetación natural e inducida, así como el nivel y tipo de afectación de las comunidades vegetales y su dinámica. Además de conocer la localización de las áreas agrícolas de acuerdo a su disponibilidad de agua y por la permanencia de los cultivos en el terreno, así como los principales usos de suelo que se desarrollan en México (INEGI, 2014). Con base en esto, se podrán definir políticas para el control y administración de los recursos vegetales, silvícolas y agropecuarios.

2. ANTECEDENTES

Entre los trabajos relacionados con el presente estudio se encuentra el de Velasco *et al.* (2015) quienes realizaron un estudio de la variabilidad climática de la estación de Ciudad Serdán, aplicando el software RClimDex a datos de precipitación anual para el periodo 1945-1990, estos mostraron una ligera tendencia en aumento en el número de días secos consecutivos y una tendencia a la baja en el número de días húmedos consecutivos, mostrando algunos índices que muestran señal de cambio climático.

Los modelos de distribución potencial de especies son usados para analizar las relaciones entre la distribución actual de un conjunto de taxones y una serie de variables climáticas, es lo que realizaron Felicísimo *et al.* (2012). Analizaron los potenciales efectos del cambio climático Sobre la flora española mediante MAXENT reportaron muchos taxones de la flora amenazada, pues el 48% siendo algunas especies de *Abies* y *Quercus* son las más afectadas, ya que estas presentan un alto grado de vulnerabilidad.

Usando tres modelos de cambio climático (CCC, GFDL-R30 y de sensibilidad:+2°C de temperatura y -10% en precipitación), Villers y Trejo (2000) evaluaron la vulnerabilidad que tendrán los ecosistemas forestales en México. Reportaron con el modelo de sensibilidad, el aumento de la temperatura favorecería el establecimiento de comunidades tropicales, restando terreno a bosques templados de encino y de coníferas establecidos en climas templados y semifríos; al aplicar el modelo obtuvieron que estos últimos desaparecerían, y con el modelo CCC, habrá un aumento de la temperatura media anual en el país y un decremento en la precipitación anual, por lo cual los bosques tropicales perennifolios, subperennifolios y caducifolios tenderían a ocupar zonas de mayor altitud que la actual. Igualmente Sáenz *et al.* (2012) predijeron y mapearon el nicho ecológico del *A. religiosa* para climas contemporáneos y futuros, desarrollaron un modelo de bioclima que predice la ausencia o presencia de esta especie, encontraron que el

área ocupada por el nicho disminuirá en un 69.2% para el 2030, 87.6% para el 2060, y 96.5% para el 2090.

Chávez *et al.* (2014), delimitaron zonas de la República Mexicana basada en el modelo de zonas de vida de Holdridge sensibles al cambio climático. Utilizaron el escenario RCP2.6 para el periodo 2016-2035 del IPCC. Obtuvieron que un incremento de temperatura de 0.3 °C provocará cambios en las zonas bioclimáticas actuales en 17.25% del total de la superficie estimada como zona de transición, cuando el incremento es de 0.7 °C, los cambios en la superficie de transición aumentan a 34.65% provocando que se ubiquen en regiones latitudinales más cálidas y regiones de humedad más secas.

Pérez *et al.* (2014), determinaron niveles de aptitud (media y alta) de *Abies religiosa* y *Pinus montezumae* en el Estado de México, utilizaron escenarios de cambio climático para los años 2030 y 2050, con modelos HADGEM y GFDL 2.0; los resultados mostraron una disminución en la superficie adecuada para el establecimiento de *A. religiosa* y *Pinus montezumae* en ambos modelos y años, además de que la precipitación, temperatura y profundidad del suelo son los principales limitantes. Por otro lado Picazo *et al.* (2015), realizaron una zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* en el estado de Oaxaca, aplicaron modelos de simulación de cambio climático, las cuales clasificaron en niveles de aptitud actual en alto, moderado y poco potencial. Para el período actual y para los años 2030, 2060 y 2090, obtuvieron que al aumentar la temperatura habrá cambios graduales al 2030 o drásticos al 2090 en la distribución de *Pinus oaxacana*, por lo que se perderá un gran porcentaje de hectáreas de esta especie o migrará a otras. Por otra parte, Gutiérrez y Trejo (2014), analizaron el efecto del cambio climático en la distribución de cinco especies arbóreas de bosque templado en México, utilizaron dos modelos (MPIECHAM5 y UKMOHADGEM1) y dos escenarios (A2 y B2), encontraron que las especies arbóreas experimentarían reducciones en sus áreas de distribución potencial, debido a las modificaciones propuestas en temperatura y precipitación, además se espera que las especies longevas sean las más vulnerables a los cambios en el clima, y que las especies que se encuentran en

ecosistemas geográficos confinados a las montañas, son más sensibles a los cambios en las condiciones climáticas (Gutiérrez y Trejo, 2014).

Analizando la distribución geográfica de especies y su relación con el cambio climático, Estrada *et al.* (2015) realizaron estudio sobre la vegetación de Veracruz utilizando la técnica de modelado de nicho ecológico GARP. Obtuvieron que para la superficie actual de la vegetación de este Estado, habrá una afectación de reducción potencial de 53% del área de distribución principalmente para el bosque tropical perennifolio, de 16% para el bosque de coníferas y de 49% para el bosque mesófilo de montaña. Además, en un futuro algunas especies pueden aumentar su distribución y otras se verán afectadas hasta su pérdida en estos ambientes.

Cruz *et al.* (2016), modelaron la distribución potencial espacial de 12 especies de *Pinaceae* con Maxent en el estado de Michoacán en condiciones actuales y en condiciones futuras para los años 2015-2039 y 2075-2099. Obtuvieron una disminución del área potencial de áreas idóneas para su distribución, haciendo mención en *A. religiosa* como una de las especies más afectadas, mostrando una reducción de mayor de 72% para su distribución.

Sin embargo, un trabajo realizado por Pérez *et al.* (2017) cuyo objetivo fue determinar la distribución potencial de *Abies religiosa* en el Eje Neovolcánico Transversal bajo escenarios de cambio climático, obtuvieron un incremento considerable en la superficie de distribución potencial para el escenario RCP4.5 de la que existe actualmente, así como también obtuvieron un desplazamiento hacia zonas de mayor altitud en el Eje Neovolcánico Transversal.

3. JUSTIFICACIÓN

La magnitud del impacto del cambio climático está en función de las acciones actuales y futuras que decida la población; debido a que ésta es la principal generadora de gases de efecto invernadero, siendo estos los principales de provocar un calentamiento en la tierra. Debido a que las actividades antrópicas generan modificaciones en el clima, principalmente en temperatura y precipitación es necesario el uso de escenarios, los cuales muestren alternativas del comportamiento de estas variables. Así mismo, es necesario el estudio de factores que impactan sobre la vulnerabilidad de sectores o regiones con la finalidad de mitigar o prevenir (Conde *et al.*, 2016). El cambio climático y los bosques están sumamente ligados, ya que los cambios que se producen en el clima afectan los bosques y a la vez éstos contribuyen a mitigar el cambio climático. Estudios realizados como el de Picazo *et al.*, (2015), en el que realizaron una zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* en el estado de Oaxaca, para el período actual y para los años 2030, 2060 y 2090, obtuvieron que al aumentar la temperatura habrá cambios graduales al 2030 o drásticos al 2090 en la distribución de la especie, por lo que se perderá un gran porcentaje de hectáreas de esta especie o migrará a otras. Al igual que Pérez *et al.* (2017) cuyo objetivo fue determinar la distribución potencial de *Abies religiosa* en el Eje Neovolcánico Transversal bajo escenarios de cambio climático, obtuvieron un incremento considerable en la superficie de distribución potencial para el escenario RCP4.5 de la que existe actualmente, así como también obtuvieron un desplazamiento hacia zonas de mayor altitud en el Eje Neovolcánico Transversal. Cruz *et al.*, (2016), modelaron la distribución potencial espacial de 12 especies de Pinaceae con Maxent en el estado de Michoacán en condiciones actuales y en condiciones futuras para los años 2015-2039 y 2075-2099, reportaron una disminución del área potencial de áreas idóneas para su distribución, haciendo mención en *Abies religiosa* como una de las especies más afectadas, mostrando una reducción de mayor de 72% para su distribución.

Bajo estos antecedentes es de vital importancia realizar estudios que generen conocimiento sobre el posible impacto sobre especies forestales en el estado de Tlaxcala, ya que los estudios realizados en el tema de cambio climático para

Tlaxcala están enfocados en el Parque Nacional la Malinche o a escala regional, por lo que el propósito de este estudio es realizarlo a escala estatal. El modelaje del impacto del cambio climático en la vegetación del estado de Tlaxcala, permitirá conocer las zonas sensibles a éste, así como su distribución y superficie, para tomar acciones de conservación en áreas forestales, cambios en las políticas y prácticas de manejo de áreas forestales que reduzcan la vulnerabilidad como, identificar las áreas prioritarias para las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, promover la forestación, la reforestación y la regeneración natural y asistida.

4. OBJETIVOS

General

- Evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en el estado de Tlaxcala

Específicos

- Analizar los datos de temperaturas extremas (máxima y mínima) y precipitación, para cinco estaciones climatológicas que están en la zona de estudio.
- Conocer el potencial de distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham., con condiciones de escenario base y con escenarios simulación del cambio climático RCP 4.5 y RCP 6.0
- Determinar el área potencial de distribución *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en el estado de Tlaxcala, con base a los resultados de los escenarios de simulación del cambio climático RCP 4.5 y RCP 6.0

5. HIPÓTESIS

El cambio climático tiene un impacto negativo/positivo en bosques de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. del estado de Tlaxcala, provocando una disminución o aumento de la superficie ocupada por esta especie.

6. METODOLOGÍA

6.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en el estado de Tlaxcala (figura 2), el cual se localiza en la zona central de la República Mexicana, al norte $19^{\circ}43'44''$, al sur $19^{\circ}06'18''$ de latitud norte; al este $97^{\circ}37'31''$, al oeste $98^{\circ}42'30''$ de longitud oeste. Colinda al norte con Hidalgo y Puebla; al este y sur con Puebla; al oeste con Puebla, México e Hidalgo, presenta altitudes de 2 200 a 4 420 msnm. Su extensión territorial es de 397 397 hectáreas que representa el 0.2% del país. Cuenta con 1 272 847 habitantes, el 1.1% del total del país, del cual 80% es urbana y 20% rural. El 93.81% de la superficie del estado presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (C (w)), el 5.33% presenta clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano (C (E) (w)), semiseco templado (BS1k) el 0.63% y el 0.23 % presenta clima frío (E (T)), éste localizado en la cumbre de La Malinche. La temperatura media anual es de 14°C , la temperatura máxima promedio es de 25°C y la precipitación media de 720 mm anuales (INEGI, 2017). El estado de Tlaxcala presenta una superficie boscosa de 84,075.5 ha, que cubren el 19.25 % del territorio, del cual 13.72% (54,527.2 ha) es de coníferas (Inventario Estatal Forestal IEF, 2015).



Figura 2. Localización del área de estudio

6.2 Análisis de datos climatológicos

Para la realización del análisis de las variables climatológicas, se utilizaron bases de datos de series de tiempo diarias (STD) de cinco estaciones climatológicas (Calpulalpan, Huamantla, Terrenate, Tlaxco y Zitlaltepec), que se encuentran en el estado de Tlaxcala operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). La base de datos se obtuvo a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Para el análisis de los datos se utilizó el software RClimDex 3.3.1 (Zhang y Yang, 2004; <http://www.r-project.org>, 2017). A la base de datos climatológicos (temperatura y precipitación), se le realizó un control de calidad de los datos con el software RClimDex para conocer la calidad de los mismos (Zhang y Yang, 2004).

El procedimiento para evaluar la calidad de los datos mediante procedimientos estadísticos es el siguiente:

- 1) Se remplazaron todos los datos faltantes o erróneos codificados con bandera -99.9, para no crear conflicto con la información existente, en un formato interno que reconoce R.
- 2) Se identificaron valores extremos ("outliers") de temperaturas diarias máximas y mínimas. Los valores extremos son valores diarios que se encuentran fuera de rango definido por el usuario. La región de los valores extremos se define como n veces la desviación estándar del valor del día, esto es, $[media - n*std, media+n*std]$: (Zhang y Yang, 2004).

De los 27 índices climáticos que calcula el software (ANEXO I), en este trabajo se propuso usar 8 índices por considerar que son los más importantes para las condiciones del área de estudio: precipitación total, precipitación máxima en un día, días secos consecutivos, días húmedos consecutivos, temperatura máxima extrema, temperatura mínima extrema, días con heladas ($T \leq 0$) y días de verano ($T > 25^\circ\text{C}$). Una vez realizado el análisis de calidad de los datos y corregido cualquier anomalía de éstos, se analizaron los espacios de riesgo para identificar variabilidad climática.

6.3 Espacios de riesgo

El estado de Tlaxcala cuenta con 33 estaciones climatológicas activas (figura 3); de las cuales se utilizaron cinco (Calpulalpan, Huamantla, Terrenate, Tlaxco y Zitlaltepec), su información se presenta en la tabla II. Se seleccionaron estas estaciones debido a que se encuentran cercanas a las zonas boscosas del estado, además de que cuentan con la cantidad y calidad de datos de acuerdo a RClimDex.



Figura 3. Estaciones climatológicas que se encuentran operando en el estado de Tlaxcala

Tabla II. Información de las estaciones utilizadas en este estudio

Municipio	Código de la estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Años de inicio y fin de la STD
Calpulalpan	29025	19.59	-98.63	2 601	1966-2013
Huamantla	29011	19.31	-97.91	2 475	1942-2013
Terrenate	29051	19.46	-97.95	2 640	1979-2013
Tlaxco	29032	19.59	-98.12	2 530	1943-2014
Zitlaltepec	29026	19.19	-97.90	2 565	1966-2013

Con las bases de datos de las estaciones meteorológicas se realizaron los espacios de riesgo en dos periodos de tiempo: periodo de referencia de 1961 a 1990 y periodo actual de 1991 a fecha última de datos.

Se determinaron los espacios de riesgo como indicadores de cambio climático, con el objetivo de visualizar anomalías de temperatura y precipitación que pueden considerarse como una amenaza climática para la especie (Conde *et al.*, 2006a), para ello se utilizaron bases de datos diarios de las estaciones ya mencionadas.

Estos espacios de riesgo pueden ayudar a describir la variabilidad climática en las regiones de estudio, incluida la detección de eventos climáticos extremos (Conde *et al.*, 2006b)

Un espacio de riesgo se definió como la parte extrema del eje cartesiano conformado por la temperatura en el eje horizontal, X; precipitación en el eje vertical, Y. La parte de riesgo se consideró cuando el valor de ambos es mayor o menor de 2 desviaciones estándar. Estos valores extremos podrían inducir riesgos en el sector forestal como, estrés hídrico, incremento en los episodios de incendios.

Los espacios de riesgo se obtuvieron calculando las anomalías de temperatura máxima y precipitación, (Conde *et al.*, 2006). La anomalía de precipitación se obtuvo: con la Ecuación 1, la anomalía de temperatura se obtuvo con la Ecuación 2.

$$A_i = \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} \right) 100 \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación 1}$$

Donde:

A_i = anomalía de precipitación

X_i = valor observado

\bar{X} = promedio de la serie de tiempo

$$B_i = X_i - \bar{X} \quad \dots\dots\dots\text{Ecuación 2}$$

Donde:

B_i = anomalía de temperatura

X_i = valor observado

\bar{X} = promedio de la serie de tiempo

Estos cálculos se realizaron anualmente para cada una de las estaciones, en dos períodos: uno de referencia que abarca de 1961 a 1990, el segundo llamado periodo reciente de 1991 a 2014 de acuerdo a la OMM, la cual pide al menos 30 años. En el periodo reciente, se buscan señales de cambio climático y en caso de existir identificar posibles tendencias observadas y variabilidad extrema en las variables fundamentales del ambiente, para los sistemas de la superficie terrestre. Se realizaron estudios comparativos, para las bases de datos y se hizo énfasis en los valores extremos de las variables registradas que puedan asociarse a un exceso de energía en el sistema climático.

6.4 Zonificación ecológica de *Abies religiosa*

Esta consistió en identificar las unidades que comparten iguales o similares requerimientos ambientales óptimos, para el desarrollo de la especie en estudio, las cuales se definen como áreas forestales potenciales. Esta zonificación se realizó siguiendo la metodología de García y Sierra (2014).

Las áreas de potencial se clasificaron de acuerdo a las siguientes características:

a) Alto potencial: cuando en su mayoría cumple con las variables de los requerimientos ecológicos establecidos para la especie en cuestión.

b) Moderado potencial: cuando en su mayoría se tienen características de acuerdo a los requerimientos ecológicos de la especie y algunos que aunque no cumplen con las todas características pueden ser tomados en consideración

c) Bajo potencial: cuando existen limitantes fuertes, es decir que la mayoría no cuenta con las características de los requerimientos ecológicos establecidos para la especie elegida, por lo que baja su nivel de aptitud.

Debido a que se trabajó a nivel estatal, se utilizó una escala cartográfica de 1: 250 000, considerando la cartografía existente del INEGI. Toda la cartografía se trabajó con el software ArcMap10.3, estos mapas temáticos fueron de altitud, pendiente, tipo de suelo, precipitación anual, temperatura media anual y la capa de Uso del Suelo y Vegetación serie V. En esta última capa se utilizó la información del oyamel, pino y pino-encino.

6.4.1 Modelo Digital de Elevación

El conjunto de datos del Modelo Digital de Elevación (MDE), tiene una resolución de 15 metros con Escala 1: 250 000. La información se obtuvo de INEGI (2016). <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>.

Con el MDE se generaron los mapas de: altitud y pendiente.

6.4.2 Altitud

El mapa de altitud se caracteriza por mostrar la distancia vertical media con respecto al nivel del mar, y es determinada por la cima del relieve.

Para realizar el mapa de altitud se utilizó el MDE de INEGI anteriormente mencionado, Escala 1:250, 000, y se utilizó el software ArcMap 10.3. Se reclasificaron las altitudes cada 100 metros los cuales comienzan en los 2079 hasta 4400 msnm, de acuerdo a este mapa. Debido a que el MDE está en archivo raster, se realizó una conversión de raster a vectorial.

6.4.3 Pendiente

El mapa de pendientes indica el grado de inclinación del terreno, el cual es un factor importante que determina la distribución de las especies. Este mapa se realizó con

ArcMap 10.3, la pendiente fue calculada como la máxima tasa de cambio de la elevación por unidad de distancia. Este mapa se expresa en porcentaje (de 0 a 90) en el que cada celda tiene un valor de pendiente. Se clasificaron las pendientes en 11 clases.

6.4.4 Edafología

El mapa de suelos se utilizó para definir el tipo de suelo donde se desarrolla la especie, éstas se obtuvieron de la página de INEGI (2017b) <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636>, y se utilizó en la intersección de capas. La intersección creó una nueva capa por superposición de otras, en la cual la capa resultante tuvo los atributos de las capas de entrada. La capa de salida solo contiene la información que existe en el área común a todas las capas.

6.4.5 Uso del Suelo y Vegetación

Se utilizó el mapa de Uso del suelo y Vegetación Serie V generadas por INEGI (2013), los archivos se descargaron de la siguiente página: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>, una vez que se obtuvo el archivo se recortó el estado de Tlaxcala para poder trabajarlo en la intersección de mapas.

6.4.6 Datos de precipitación y temperatura

Las bases de datos del USDA (United States Department of Agriculture, por sus siglas en inglés), se utilizaron para generar mapas climáticos de isoyetas e isotermas, las cuales se obtuvieron del sitio Web del Moscow Forestry Sciences Laboratory USDA, web: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>.

Las isoyetas e isotermas son isolíneas que unen los puntos en un plano cartográfico y que presentan las mismas temperaturas y precipitación en una unidad de tiempo

considerada sobre una superficie. Las isolíneas representan en un mapa líneas, rectas o curvas, que describen la intersección de una superficie mediante la interpolación (Distancia Inversa ponderada, Kriging, Natural Neighbor, Spline), formando gradientes relativos de la variable o parámetro estimado, con el fin de interpretar gráficamente.

De ésta se descargaron los archivos ASCII Grid de datos y mapas actuales de las variables de temperatura y precipitación total anual. Para el estado futuro se descargaron los mapas de escenarios de Cambio Climático Futuro de All North América ya que cuenta con los nuevos escenarios de emisiones denominados RCP's, presentados en el último informe del IPCC (2014).

6.4.6.1 Isotermas para el estado actual

Se realizaron los mapas de isotermas mediante el software ArcMap y se utilizaron los archivos de la USDA mencionados anteriormente. Una vez que se tuvo el archivo de temperatura, se reclasificaron los valores de temperatura en 32 clases. Se transformó el archivo raster a polígono debido a que estos mapas están a escala de Norte América y se recortó el estado de Tlaxcala. Una vez realizado todo el proceso mencionado se obtuvo el mapa de isotermas.

6.4.6.2 Isoyetas para el estado actual

Para el mapa de isoyetas se reclasificaron los valores de precipitación total anual en un intervalo de 100 clases. Una vez que se tuvo el mapa clasificado con las clases, se convirtió el archivo raster a polígono y se realizó el recorte del estado de Tlaxcala usando para obtener el shape file de éste.

6.5 Zonificación del mapa base

Para el mapa base de zonificación ecológica, se utilizaron los mapas realizados anteriormente para las variables que determinan la distribución de las especies, estas son: altitud, pendiente, uso de suelo y vegetación, isotermas e isoyetas.

En ArcMap 10.3, se realizó una intersección de todos los mapas de las variables mencionadas anteriormente. La intersección tiene como objetivo ensamblar todos los mapas generados anteriormente, posteriormente calculó el área de cada polígono.

Con base en los requerimientos ecológicos en los que se desarrolla la especie (tabla III), se realizó la zonificación actual y futura de *A. religiosa* aplicando modelos de simulación de cambio climático, con el objetivo de identificar zonas potenciales para cada variable.

Tabla III. Matriz de requerimientos ecológicos de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham.

Requerimientos	Categoría de aptitud		
	Alto	Moderado	Bajo
Vegetación	Oyamel	Pino	Pino-encino
PCP (mm)	1000-1200	900-1000	800-900
Temperatura (°C)	08-12	12-15	<6-8, >15
Suelo	Cambisol-Andosol	Regosol-Feozem	Feozem
Altitud (msnm)	3000-3500	2800-3000	2600-2800
Pendiente (%)	30-70	10-20	70-80

Una vez obtenidos los mapas con la zonificación y niveles de aptitud, se cuantificó el área potencial para cada nivel. Para ello, en la tabla de atributos del shape del mapa base, se agregaron campos de las variables que se consideraron y finalmente, se clasificaron del 1 al 3; siendo 1 el intervalo con potencial alto y que además, en ninguna de las variables a las que se agregó un valor puede tener un 3 o 0. Para moderado potencial el promedio tiene que ser de 2 y además la primera y segunda variable no puede tener 3 y ninguna de las variables puede tener 0. Para potencial bajo el promedio es de 2 y ninguna de las variables puede tener 0 y todas las variables pueden tener 3. Todo esto se realizó con base a la tabla de requerimientos ecológicos de *A. religiosa* y revisando las diferentes combinaciones de las variable (García y Sierra, 2014).

Con la finalidad de verificar los resultados generados por ArcMap 10.3, de áreas potenciales de desarrollo de la especie, se incluyeron datos tomados en campo, donde se obtuvieron coordenadas geográficas (latitud y longitud) y altitud de sitios donde se encuentra la especie, con la finalidad de conocer los límites de tolerancia o umbrales que necesita la especie para desarrollarse. También mediante revisión bibliográfica y el uso de sistemas de información geográfica en la base de datos del Servicio Mundial de Información sobre Biodiversidad (GBIF por sus siglas en inglés), utilizado en el software QGIS 2.14 y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (<https://www.species.conabio.gob.mx/>, 2016). Finalmente, se obtuvo el mapa de zonificación de *A. religiosa*.

6.6 Zonificación ecológica de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. considerando escenarios generados por modelos de cambio climático

El objetivo de realizar mapas aplicando escenarios generados por modelos de simulación de cambio climático, es identificar por medio de mapas, las áreas afectadas por el cambio climático (García y Sierra, 2014).

Se utilizaron los modelos mencionados por García y Sierra (2014), estos se obtuvieron del Moscow Forestry Sciences Laboratory USDA, de la siguiente página: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>. Para este trabajo se utilizó el modelo de simulación HadGEM2ES con escenarios RCP 4.5 y 6.0, para los años 2030 y 2060.

6.6.1 Cálculo del Índice de aridez

Se utilizaron las variables de temperatura, precipitación e índice de aridez, utilizadas por García y Sierra (2014) el índice de aridez es la variable más recomendada para ser utilizada en la zonificación ecológica de especies vegetales, ya que este es un indicador de calor disponible para el crecimiento de plantas y está relacionado con la distribución de ellas.

La confiabilidad de los datos obtenidos consultando la página citada, es de zonas de 1 km (celdas de 0.00833333 grados decimales), considerando los datos históricos de aproximadamente 4,000 estaciones climatológicas.

La página de descarga de los archivos es la misma del mapa actual. Posteriormente, en ésta se eligió la opción de All North America. Esta extensión abarca una superficie de -177 a -52 de longitud y latitud 13,9 a 80 grados, Incluye todos los datos utilizados en las extensiones originales de América del Norte occidental (incluyendo México) más datos del este de Estados Unidos y Canadá. También se seleccionó el modelo HadGEM2ES, con escenarios 4.5 y 6.0, para los años 2030 y 2060; posteriormente se descargaron los archivos de temperatura y precipitación. Una vez que se tienen descargados los archivos de las variables de precipitación y aridez, se cargaron estos en ArcMap 10.3 y se calculó el índice de aridez mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{(dd5)0.5}{\text{map} (\sqrt{2} \text{grados día} > 5^\circ\text{C} / \text{precipitación media anual})}$$

Ecuación 3

Donde:

$dd5$ = Grados Día $> 5^\circ\text{C}$

map = precipitación total anual

Obtenido el raster con el cálculo de índice de aridez se reclasificaron los valores de éste, y se convirtió el archivo a shape file.

Después se realizó una intersección de este último shape file con el de uso de suelo y vegetación de la serie V, así se obtuvo una sola capa con el índice de aridez y los tipos de vegetación del estado.

De los archivos generados, se calculó la media y distribución estándar de cada tipo de vegetación, se normalizaron los datos con la media y desviación estándar, se definieron los valores máximos y mínimos del índice de aridez para cada tipo de vegetación.

6.6.2 Mapas de isotermas e isoyetas aplicando escenarios de cambio climático

Una vez que se tuvieron los archivos se prosiguió a trabajarlos en ArcMap, se cargaron los archivos de las variables climáticas, se realizó el mismo procedimiento del mapa base. Una vez obtenidos los shapes de precipitación y temperatura se prosiguió a elaborar el mapa de zonificación con los escenarios de cambio climático incluyendo los mapas de suelo, pendiente, altitud y uso del suelo y vegetación.

Así mismo se hizo una compensación de la altitud por aumento de temperatura de acuerdo a Sáenz (2011), ya que por cada 100 metros la temperatura disminuye 0.5°C.

Se calculó el porcentaje de cambio para cada modelo y escenario utilizado mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de cambio} = \left(\frac{S1 - ST}{ST} \right) 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$S1$ =superficie de escenario

ST = superficie total

7. RESULTADOS

7.1 RClimDex

De los 27 índices que genera el software RClimDex (Anexo I), para este trabajo se eligieron ocho (tabla IV). Se consideraron estos índices, debido a que son los que aportaron mayor información para identificar cuales tienen menor o mayor impacto en la especie en estudio.

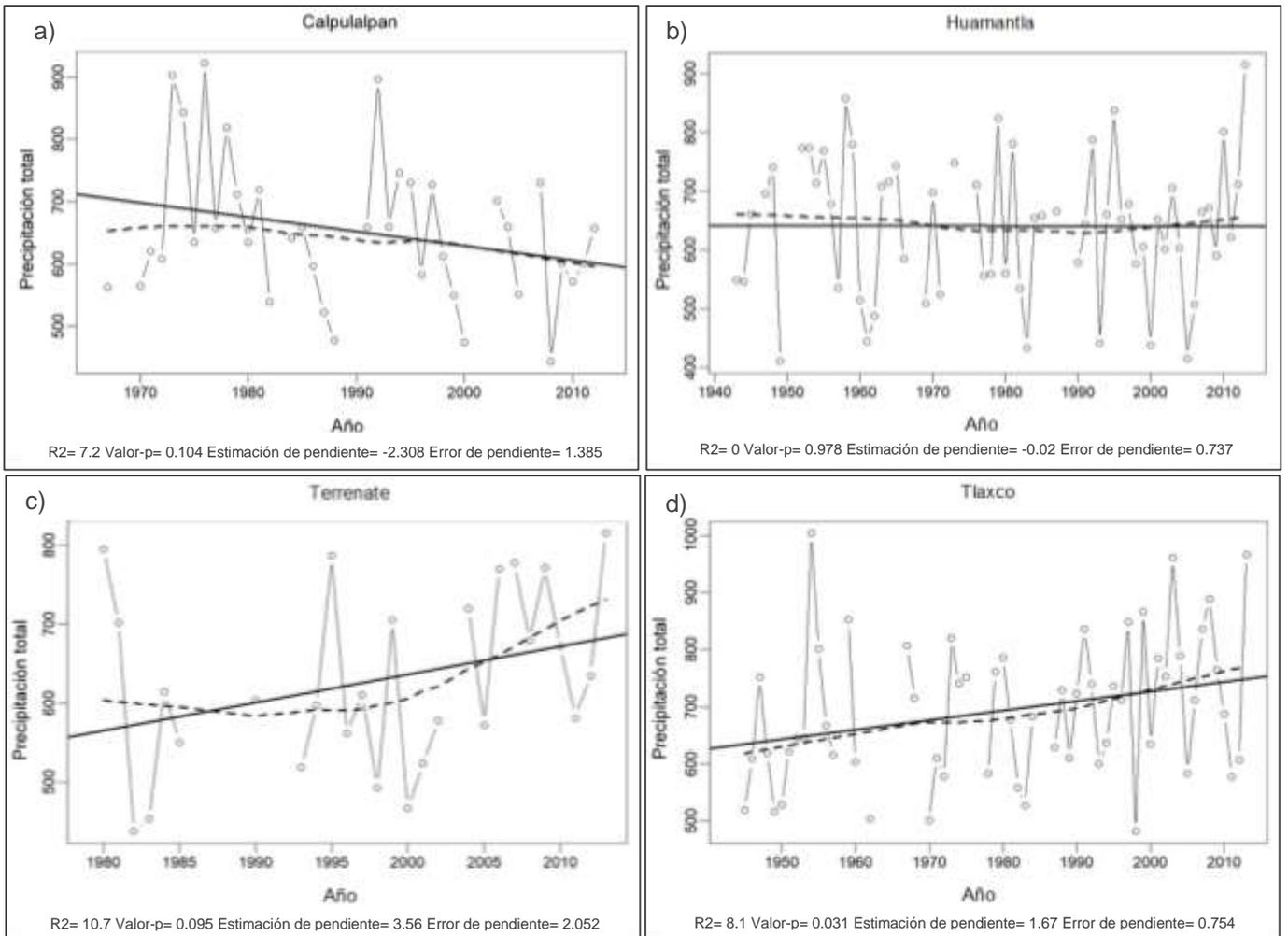
Tabla IV. Índices analizados de RClimDex

Índice	Definición	Unidades
PRCPTOT: Precipitación total anual	Precipitación total anual en los días húmedos cuando es ≥ 1	mm
RX1day: Precipitación máxima en un día	Precipitación máxima mensual en un día	mm
CDD: Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es < 1 mm	días
CWD: Días consecutivos húmedos	Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es ≥ 1 mm	días
TXx: Temperatura máxima extrema	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	$^{\circ}\text{C}$
TNn: Temperatura mínima extrema	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	$^{\circ}\text{C}$
FD0: Días de heladas	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) es $< 0^{\circ}\text{C}$	días
SU25: Días de verano	Número de días en un año cuando es $> 25^{\circ}\text{C}$	días

7.1.1 Precipitación total anual

En Calpulalpan vario cada año, con una tendencia a disminuir progresivamente en los últimos años. Se presentó un intervalo de 500-900 mm (Figura 4a). En Huamantla, en los años 1957, 1979, 1995 y 2013 se registraron valores mayores a los 800 mm, sin embargo, hay años secos con precipitaciones menores a los 500 mm (Figura 4b). En el 2013 se registró la precipitación mayor (815.1 mm), y en 1982 el valor menor (437.6 mm) (Figura 4c), sin embargo, la tendencia es en aumento. La variabilidad interanual en la figura 4d presentó un intervalo de 500 a 1000 mm de precipitación total anual, la tendencia mostró un aumento de este índice, no se destacan años anómalos. En la figura 4e, los valores van en un intervalo de 500 a

1000 mm, mostrando una considerable variación. Por otro lado, Calpulalpan presentó impacto mayor, con tendencia a la baja en dos periodos muy marcados (1969 a 1990 y 1991 a 2013). En Tlaxco y Zitlaltepec, son las estaciones que registraron mayores precipitaciones (1000 mm).



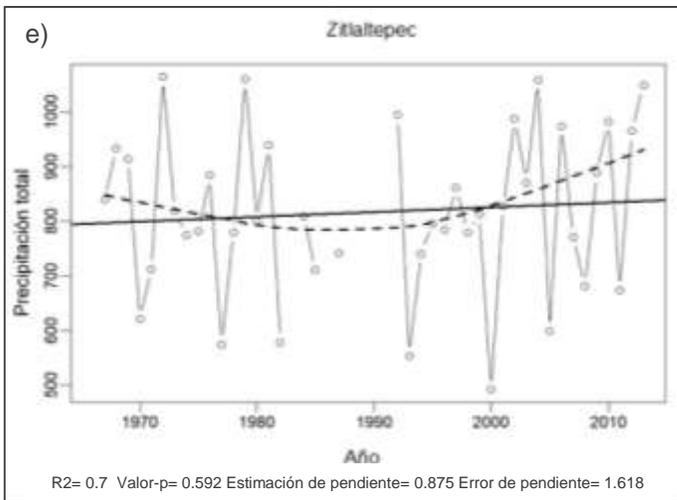


Figura 4. Precipitación total anual en los días húmedos cuando es ≥ 1 (mm)

7.1.2 Precipitación máxima en un día

La figura 5a muestra la gran variabilidad entre días de máximos (92.2 mm) y mínimos (18.5 mm) mostrando una gran heterogeneidad a lo largo de los años. En la figura 5b la precipitación máxima se presentó en promedio 50 días al año con una tendencia positiva, lo cual indica que la precipitación máxima en un día está aumentando como se ve para los años 1997 y 2013. La figura 5c registró mayor amplitud en pocos años. La tendencia de grafica 5d muestra un aumento en los días con precipitación máxima en un día. Se presentó un ligero aumento en la precipitación máxima en un día en la figura 5e. Terrenate y Tlaxco mostraron mayor número de días con precipitación máxima en un día, así mismo ambas muestran tendencias positivas. Todas las estaciones mostraron amplia variabilidad interanual.

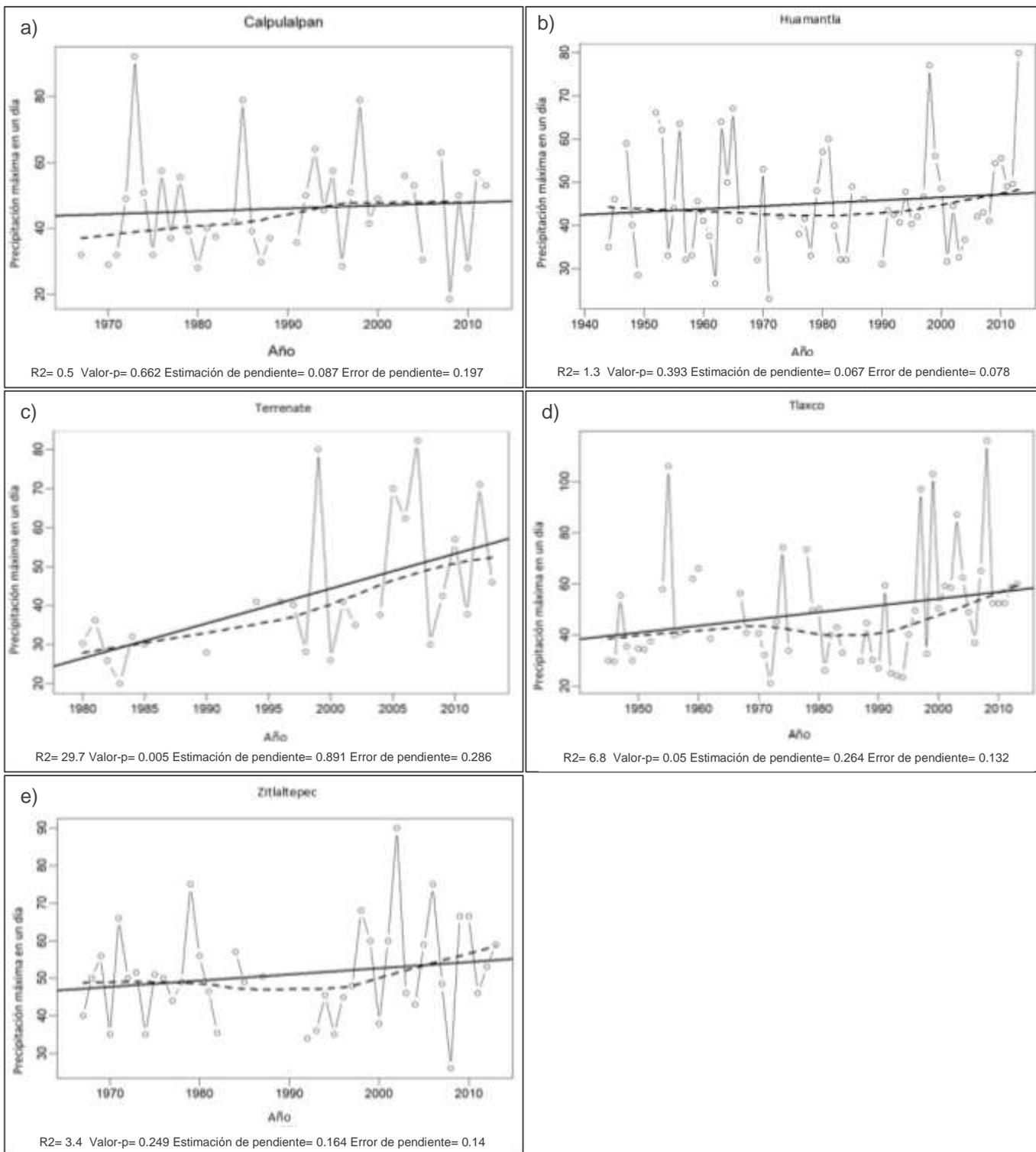
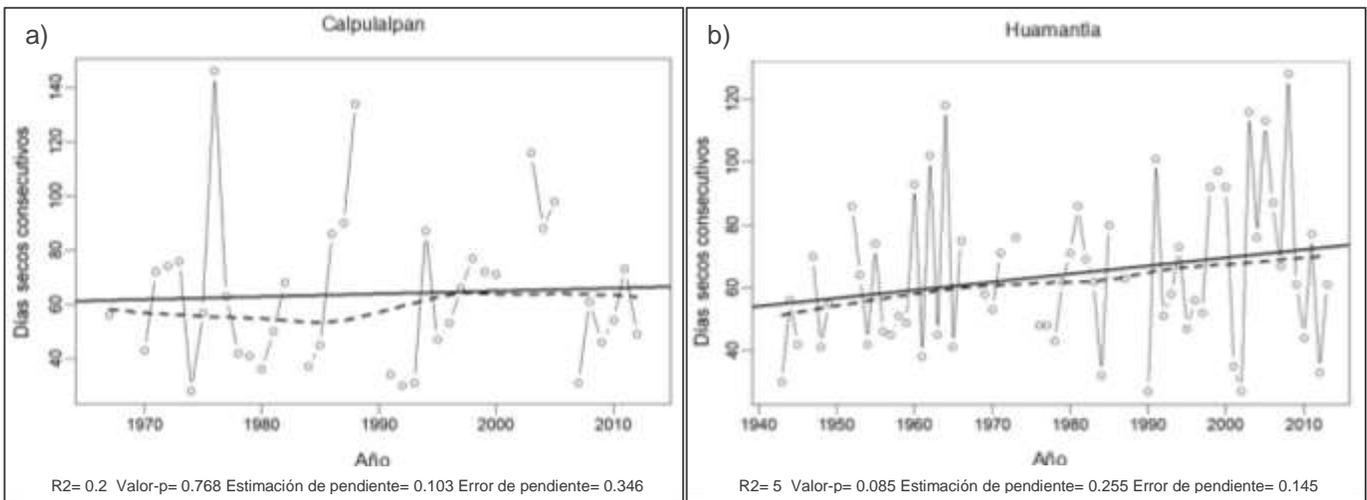


Figura 5. Precipitación máxima mensual en un día (mm)

7.1.3 Días secos consecutivos

Calpulalpan, en los años de 1976 y 1988 fueron los más secos (146 y 134 días), y contrario a los demás años con un intervalo de 35 y 50 días (figura 6a). En la figura 6b se observó variabilidad en toda la serie de tiempo, sin embargo, la tendencia de los periodos con lluvias menores a 1 mm va en aumento, lo que indicó que aumentaron los días secos consecutivos. La figura 6c mostró una tendencia significativa, lo que indica un aumento en el número de días secos consecutivos, teniendo un intervalo de 40 a 140 días, la media oscila entre 80 días. En la figura 6d, no se observaron cambios significativos en este índice, el intervalo oscila entre 20 a 140 días. En la figura 6e se muestra una tendencia a la alza, esto indica que los días secos consecutivos están aumentando, también se observa que a partir de las últimas dos décadas la amplitud es mayor llegando a los 140 días. Terrenate, Huamantla y Zitlaltepec, son las estaciones que muestran cambios significativos, mostrando los dos periodos antes mencionados muy marcados.



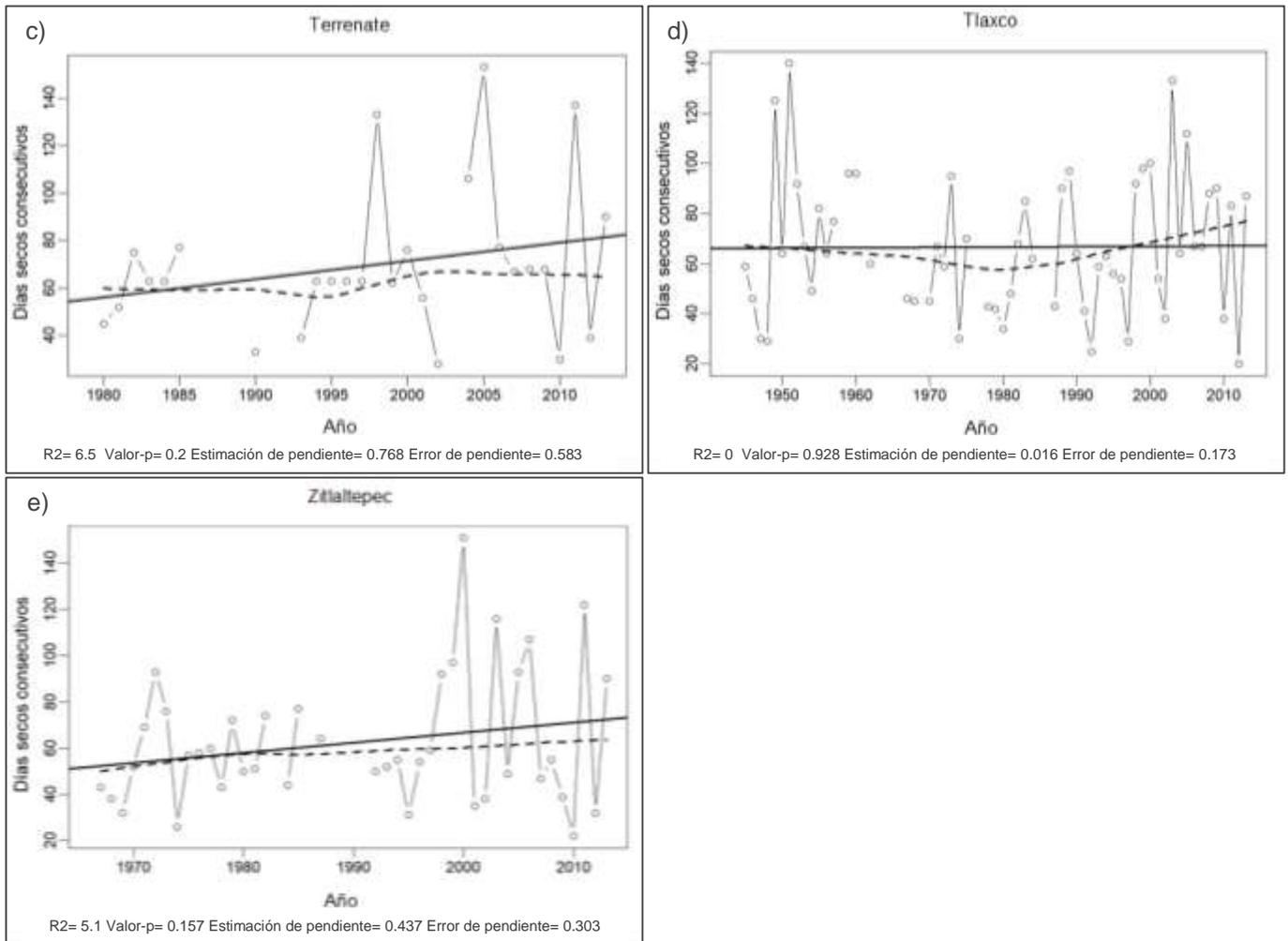
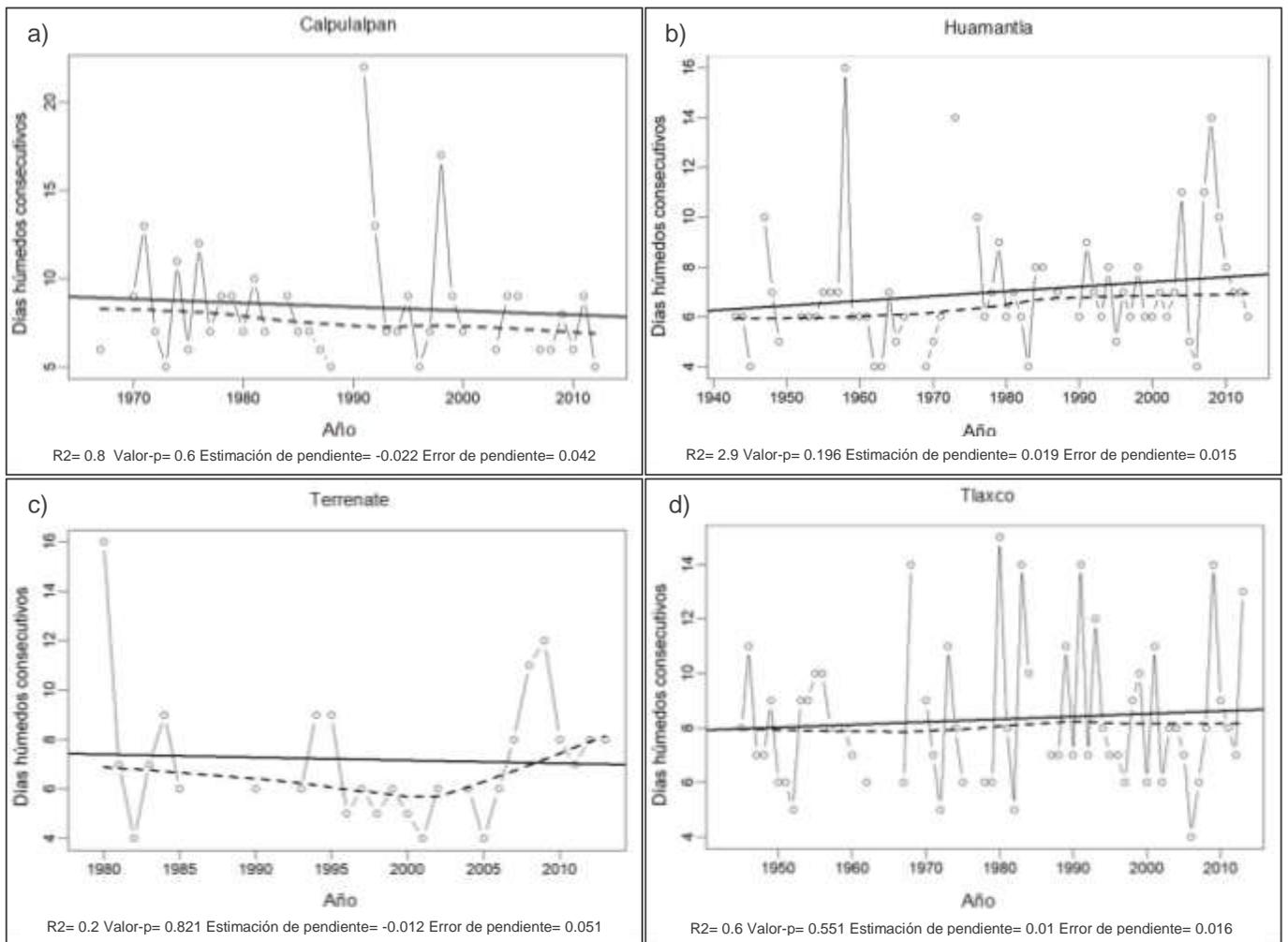


Figura 6. Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es <1mm

7.1.4 Días húmedos consecutivos

Todos los años de la figura 7a mantuvieron en promedio en un intervalo entre 4 y 13 días con humedad, a excepción de las anomalías registradas en 1991 y 1998, cuyo intervalo de días húmedos osciló entre los 22 y 17, siendo estos años de EL NIÑO. Destacando 1998 con un inicio tardío del inicio de precipitación, generando esto una época propicia para incendios forestales. Con lo que respecta a la línea de tendencia y a lo observado, se notó una ligera baja en estos días entre 9 y 4. La figura 6b presentó una tendencia positiva, lo que indicó un aumento en los días húmedos consecutivos en un año. Cabe mencionar que los días secos consecutivos son mayores en comparación con los días húmedos consecutivos. Se destacó 1980

como el año con mayor número de días húmedos consecutivos, sin embargo, no se observó variabilidad significativa (figura 6c). Tlaxco presentó (figura 6d), a partir de 1968 una mayor amplitud, así como una ligera tendencia al aumento de éstos días, contrario a Zitlaltepec (figura 6e), donde presentó una tendencia negativa, esto indica que los días húmedos están disminuyendo.



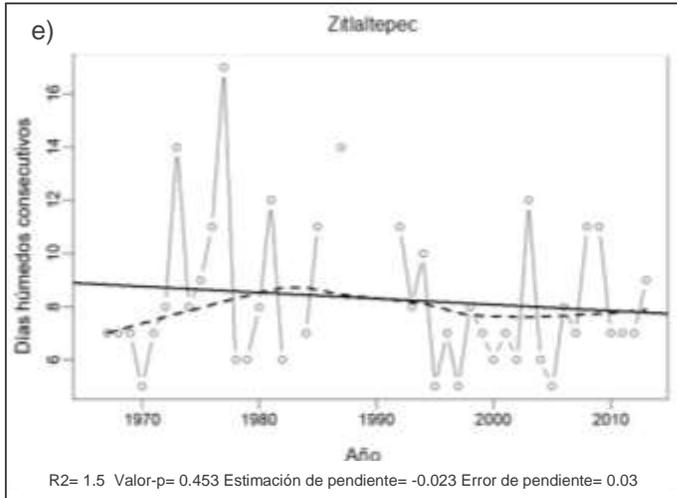


Figura 7. Número máximo de días consecutivos con precipitación cuando es ≥ 1 mm

7.1.5 Temperatura máxima extrema

Calpulalpan mostró dos periodos en los cuales para el primero las temperaturas se mantuvieron constantes en promedio de 29°C , en el segundo periodo se incrementó a 37°C para 1998 que correspondió a año de EL NIÑO, siendo este el más extremo en las últimas décadas (figura 8a). Huamantla presentó una tendencia a la baja, lo que indica que se están presentando temperaturas menos cálidas, con valores promedio de 31°C (figura 8b). La variabilidad interanual de Terrenate (la figura 8c) va en aumento, en la temperatura máxima a partir del periodo base, lo cual puede ser una señal de cambio climático, siendo 2005 con 33°C . Tlaxco presentó una tendencia significativa positiva, lo cual indica que la temperatura máxima extrema está aumentando siendo el 2004 como el año con mayor temperatura máxima (figura 8d). En la figura 8e se aprecia una tendencia significativa positiva, indica que la temperatura máxima extrema está aumentando, destacan 1998, 2002 y 2005 (35°C) siendo estos años de EL NIÑO. Calpulalpan, Zitlaltepec, Terrenate y Tlaxco son las estaciones que presentan mayor impacto en este índice. Todas las estaciones mostraron los periodos de referencia y el actual, con comportamientos muy marcados.

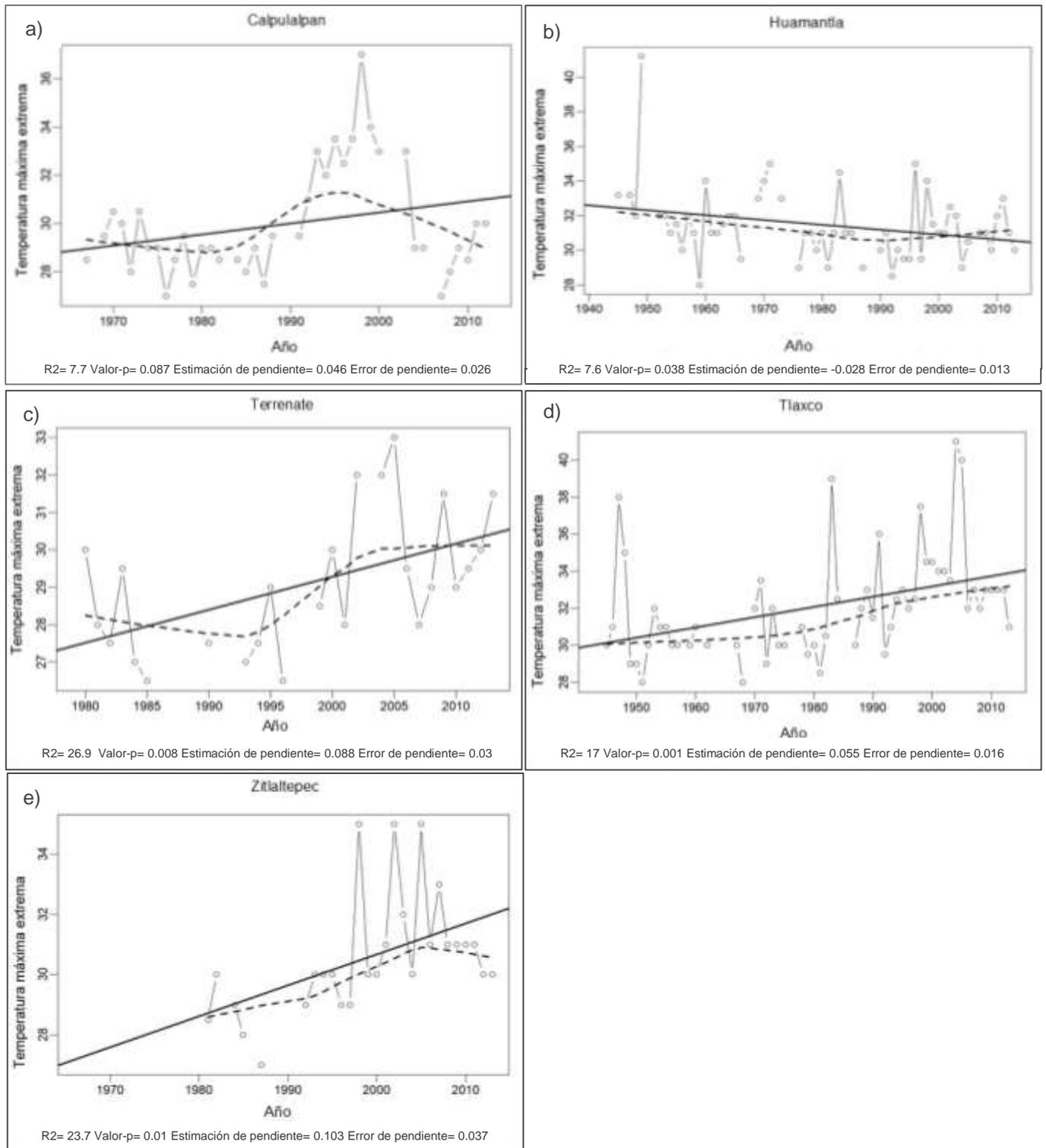
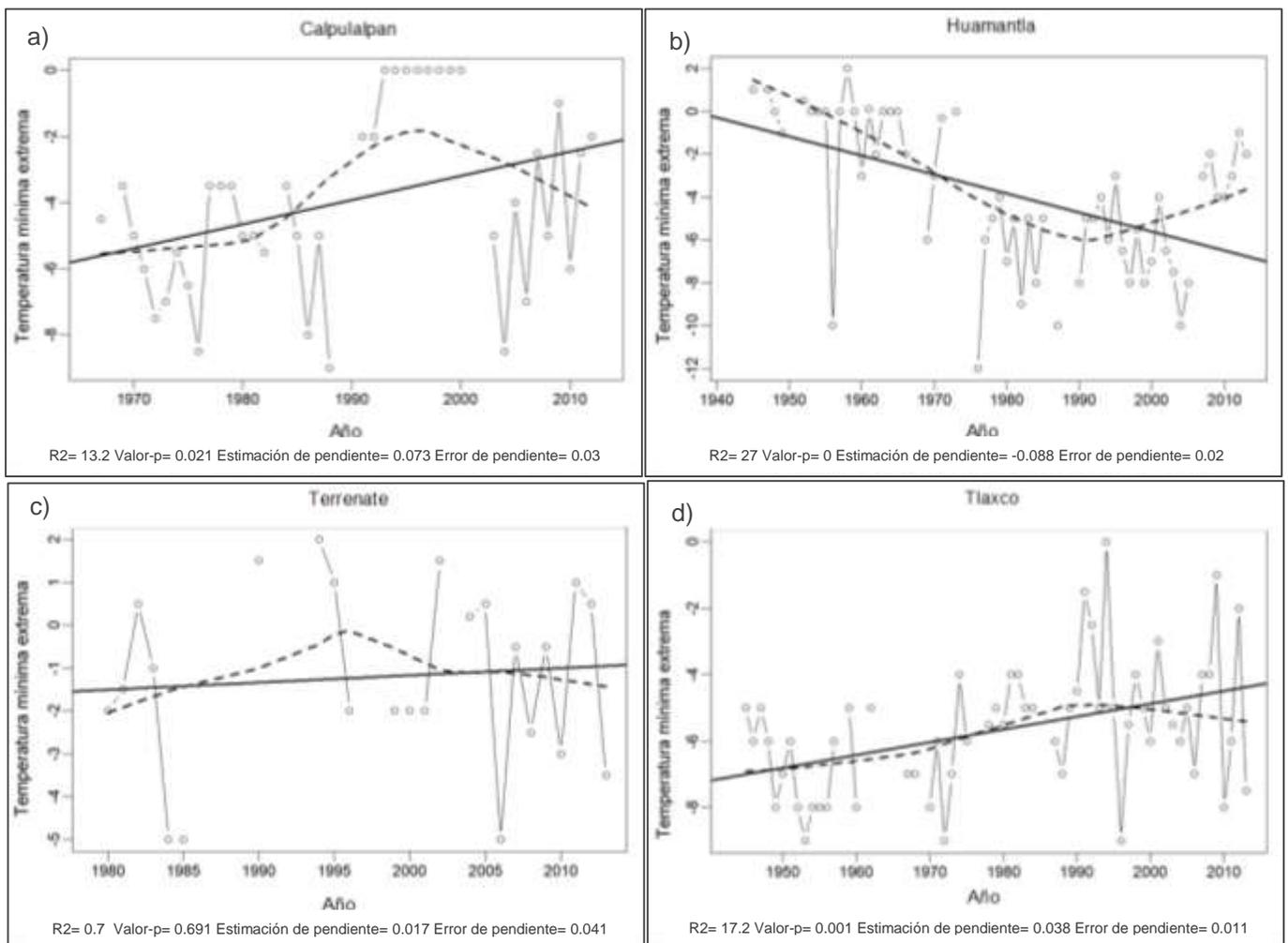


Figura 8. Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria

7.1.6 Temperatura mínima extrema

Calpulalpan presentó un cambio en la variabilidad interanual, los años de 1993 al 2000 se destacaron por tener temperatura anual de cero, la mínima más extrema correspondió a 1988 con un valor de -9°C . La línea de tendencia muestra una tendencia hacia la recuperación del sistema con temperaturas menos frías (figura 9a). La línea de tendencia de Huamantla (gráfica 9b) presentó, una disminución en las temperaturas con valores menores o iguales a -7°C ; aunque en los últimos años los valores fueron menos fríos en promedio -2°C ; indica que los días con temperatura mínima extrema están disminuyendo. En Terrenate se destacan 1984, 1985 y 2006 como los años con mayor temperatura mínima extrema (figura de 9c). La tendencia es positiva en Tlaxco (figura 9d) con un aumento en la temperatura mínima extrema. Zitlaltepec presentó una tendencia a la alza (figura 9e).



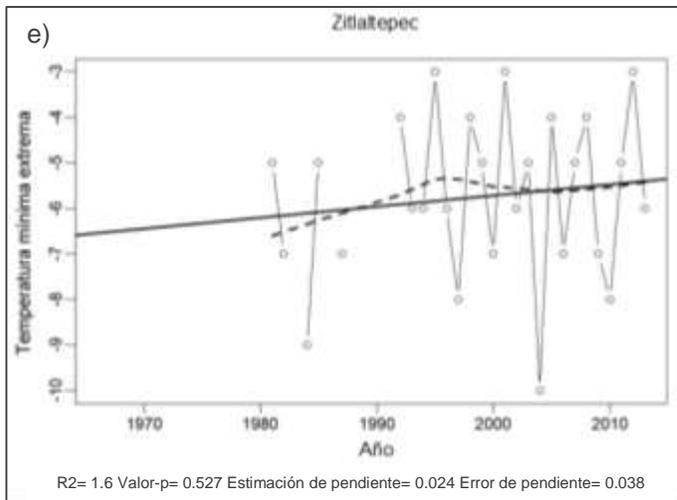


Figura 9. Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria

7.1.7 Días de heladas

Se presentaron en Calpulalpan en promedio 40 días con heladas, sobresaliendo dos eventos extremos en 1970 y 1986, en donde el número fue por arriba de las 55 heladas (figura 10a). Para los años posteriores tienden a disminuir en promedio a 18 heladas, lo que coincide con la línea de tendencia que es a la baja para esta variable. Cabe destacar los años 1993 al 2000 se muestra un periodo libre de heladas. Huamantla (figura 10b) mostró una tendencia positiva, lo que indicó que los días con heladas están aumentando, se destaca 1999 como el año con mayor número de días con heladas, siendo este valor de 60. Terrenate y Tlaxco (figuras 10c y 10d) mostraron una tendencia a la baja, lo que indicó que los días con heladas están disminuyendo, sin embargo, la figura 9e mostró que los días con heladas están aumentando. Es importante recalcar que Tlaxco presenta el mayor número de días con heladas (80) y Terrenate presenta el menor número de días con heladas siendo el máximo de 12 en el año 1995. Calpulalpan, Huamantla y Tlaxco presentaron un promedio de 40 días con heladas durante el periodo observado.

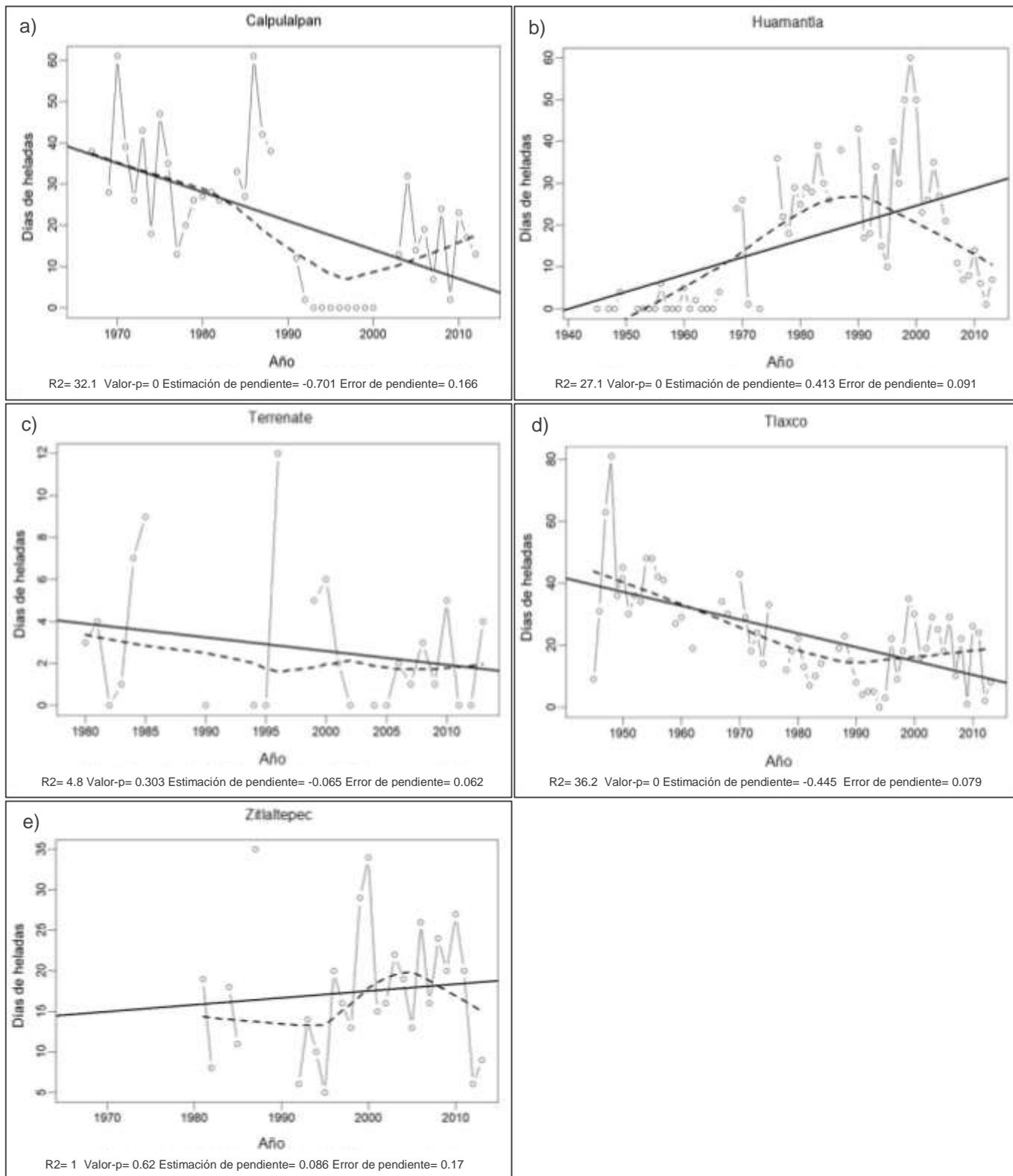
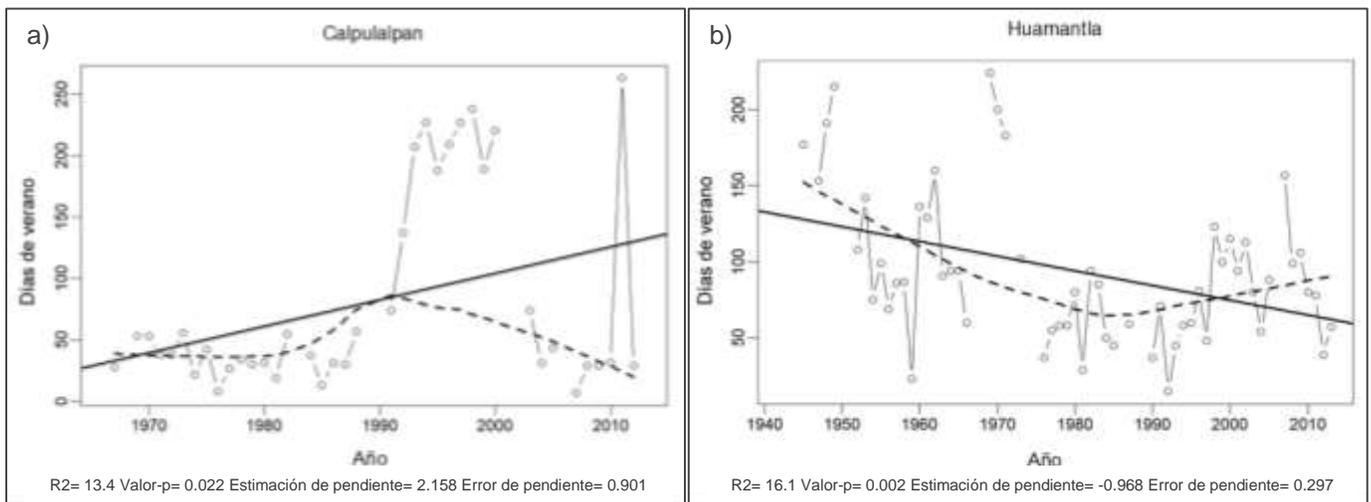


Figura 10. Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) es <0°C

7.1.8 Días de verano

Calpulalpan presentó en los primeros años (1970-1990) en promedio 40 días de verano, sobresaliendo la década de los 90's al 2000 donde se mostró un cambio diferenciado con un incremento de hasta 200 días para posteriormente regresar al promedio anterior (figura 11a), destacando el 2011 como un año anómalo en donde se presentaron más de 250 días con verano, lo cual generaría un ambiente más cálido y la tendencia para los años posteriores es positiva. En la figura 11b se muestra variabilidad de los días de verano, contrario a días con heladas, la línea de tendencia mostro que los días con verano están disminuyendo, contrario a la figura 11c, mostró que los días con verano están aumentando, así lo mostró la línea de tendencia, sobresale 2004 con 248 días de verano en un año que fueron mayor a 25°C. Igualmente Tlaxco (figura 11d) presentó que los días de verano están aumentando, a partir de 1993 se mostró un aumento mayor, se observó un aumento en los días de verano con una tendencia significativa, al igual que Zitlaltepec (figura 11e). Cabe recalcar que las estaciones de Calpulalpan, Huamantla, Terrenate y Tlaxco, presentaron un intervalo entre 250 y 200 días con verano, y Zitlaltepec tuvo un máximo de 100 días.



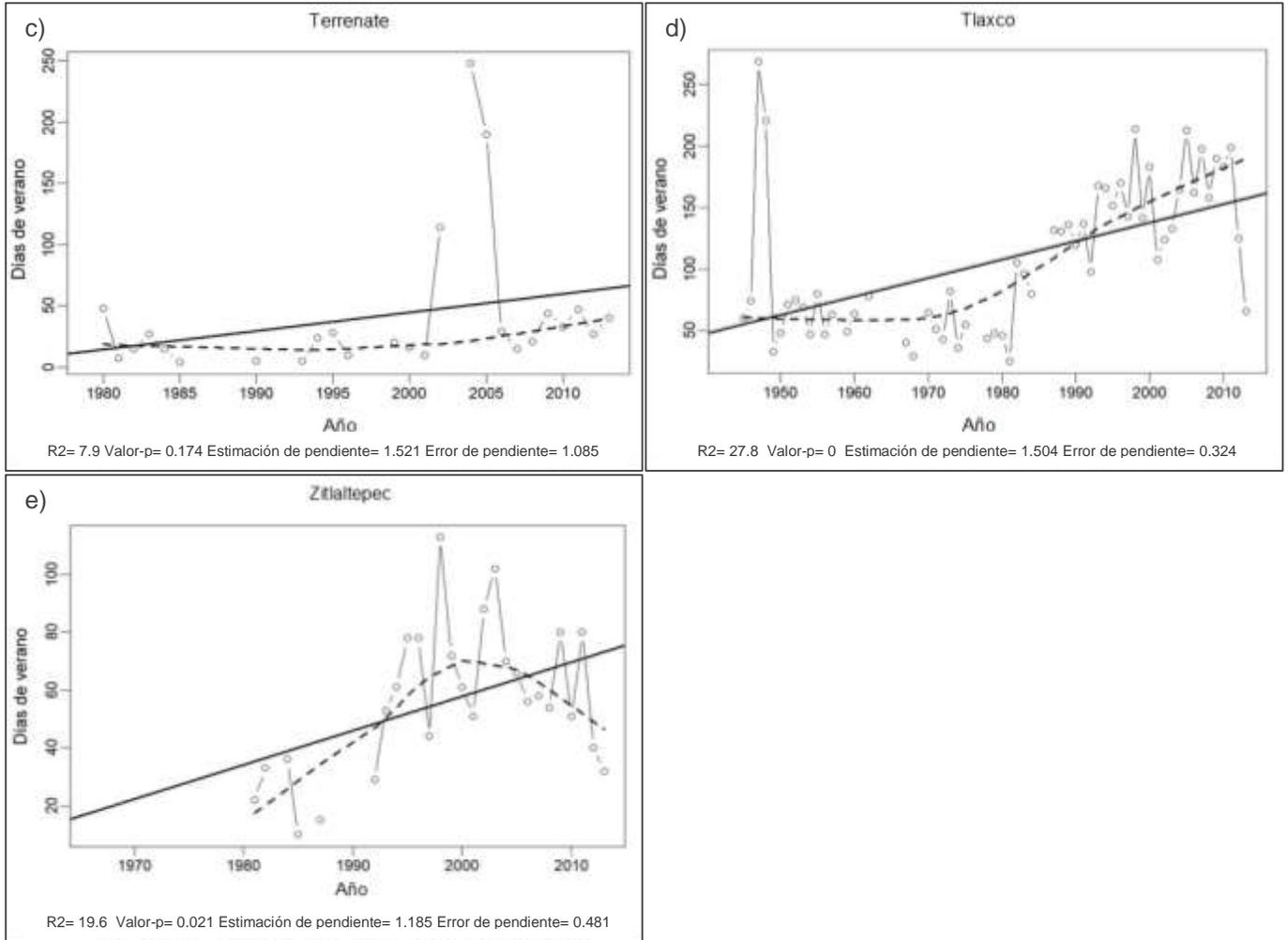


Figura 11. Número de días en un año cuando es >25°C

7.2 Espacios de riesgo

Las anomalías están representadas para temperatura máxima y precipitación. Los años están representados por sus últimos dos dígitos, por ejemplo 99 es igual a 1999. En éstos, los números de color rojo representan eventos de EL NIÑO, mientras que los de color azul representan eventos de LA NIÑA y los de color negro eventos NEUTROS. Los rectángulos presentan los valores de una y dos desviaciones estándar, donde; el espacio de riesgo para el sector forestal se encuentra cuando se da una disminución en la precipitación y un aumento en la temperatura máxima; es decir cuando hay anomalías que se encuentran fuera de estos intervalos, se pueden visualizar años con condiciones climáticas

amenazantes, añadiendo si se combinan una disminución en la precipitación y un aumento de temperatura.

7.2.1 Espacios de riesgo de la estación de Calpulalpan

En el periodo de los años 1961 a 1990, se presento anomalias de precipitación entre 38% y -38%, y una anomalía de temperatura de -1°C a 1°C. La variabilidad climática natural se concentra en 5°C de temperatura y 20% de anomalía de precipitación (figura 12a). En el periodo (1991-2013), destacan 1992, 1998 y 2011 como años anómalos. Se mostraron mayoría de años con anomalías positivas en temperatura, y anomalías tanto positivas como negativas en precipitación, concentrándose la mayoría de los años fuera de una desviación estandar (la figura 12b).

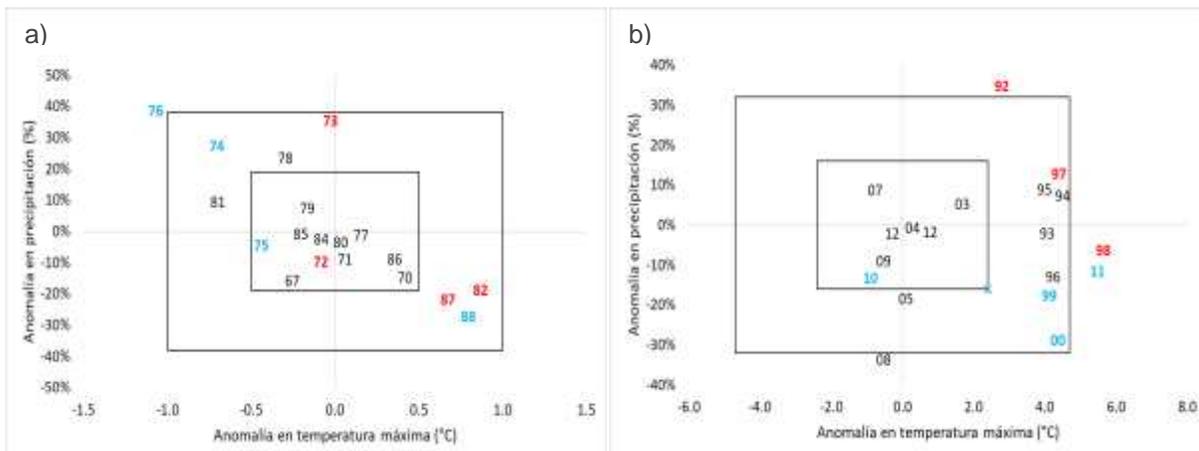


Figura 12. Espacios de riesgo para Calpulalpan: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2013).

7.2.1 Espacios de riesgo de la estación de Huamantla

Los cambios en temperatura y precipitación, en el periodo base se observó que la mayoría de los años presenta anomalías negativas en temperatura, la dispersión de los años se encuentra dentro de la variabilidad climática natural. Se aprecian dos grupos, el primero con mayor número de elementos y el segundo diferenciado con solo 5 años, destacando los años de El NIÑO 1982 y 1983 (La figura 13a). En el periodo actual se obtuvo una anomalía en la precipitación de 20% y una anomalía en la temperatura máxima de 0.7°C, para dos desviaciones estándar una anomalía en la precipitación de 40% y en la temperatura máxima una anomalía de 1.5°C. Con

respecto a las otras estaciones, en ésta hay una distribución más homogénea, el impacto de El Niño de 1998 fue menor ((figura 13b).

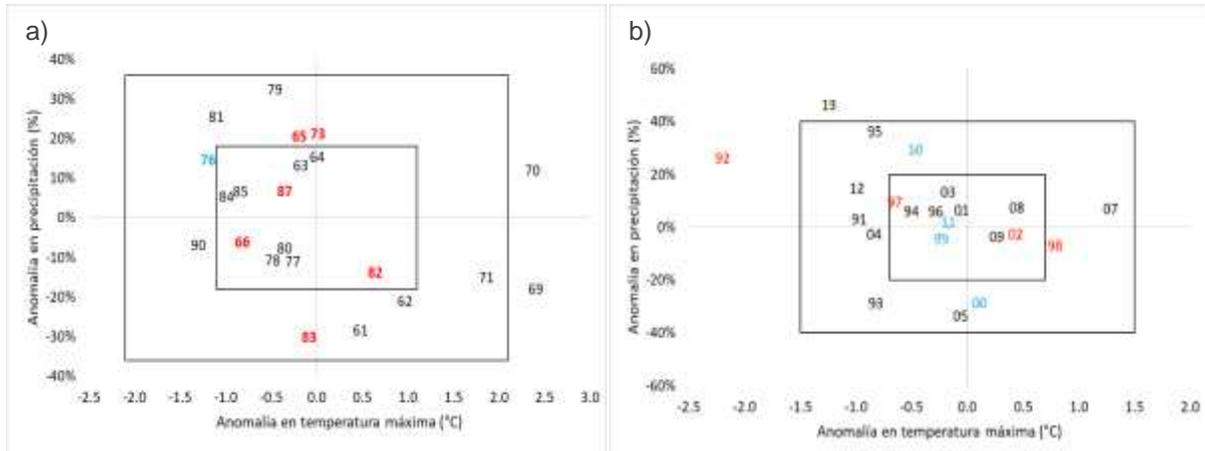


Figura 13. Espacios de riesgo para Huamantla: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014)

7.2.3 Espacios de riesgo de la estación de Terrenate

Para este sitio se registraron relativamente con pocos datos, en el cual destacan años 83 y 82 que se encontraron dentro de dos desviaciones estandar, siendo estos años de EL NIÑO (La figura 14a). La anomalía de precipitación se encuentra en un intervalo de 40%-30% y para temperatura de -0.5°C a 1°C. Para el periodo actual se destacan los años 2002 y 2005 como años anómalos donde se observa un aumento en la de temperatura de hasta 2°C, así como una disminución en la precipitación (figura 14b). Así mismo se observó una disminución del 10% en precipitación en comparación con el escenario base.

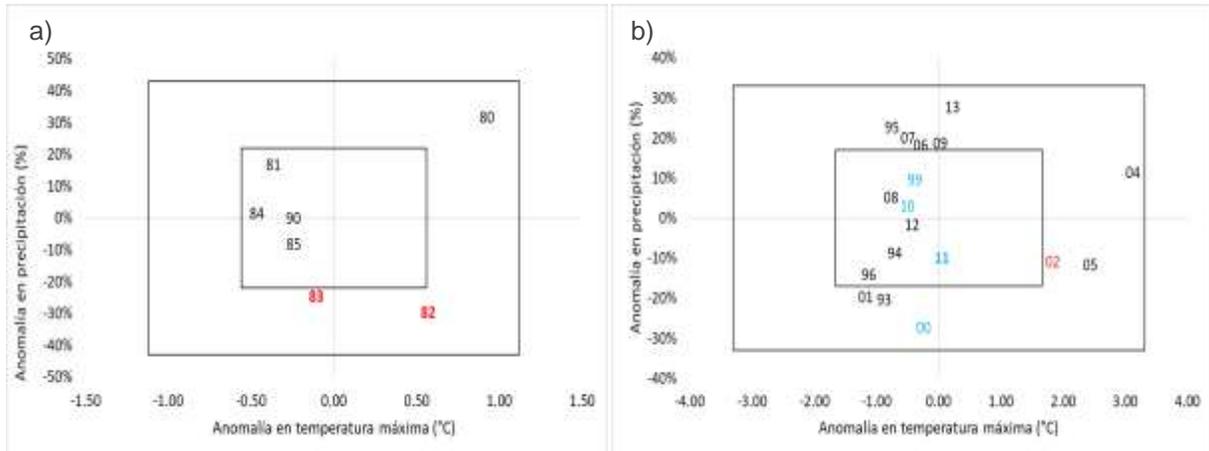


Figura 14. Espacios de riesgo para Terrenate: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2013).

7.2.4 Espacios de riesgo de la estación de Tlaxco

Para este sitio hubo una disminución en la precipitación de hasta 25% y en temperatura anomalías positivas de hasta 2°C, se destacó por su tendencia a presentar categorías agrupadas. La distribución de la variabilidad varía entre las anomalías de temperatura máxima de -5°C y 2°C y de precipitación entre 35% hasta -25%. (figura 15a). En el periodo actual (figura 15b) los años se agruparon en anomalías positivas en temperatura, con un aumento de hasta 4°C, destacando el año 1998 como anomaloso, así mismo la precipitación aumentó hasta 60% y hubo una disminución del 30%. Gran parte del periodo observado se mostraron como años atípicos.

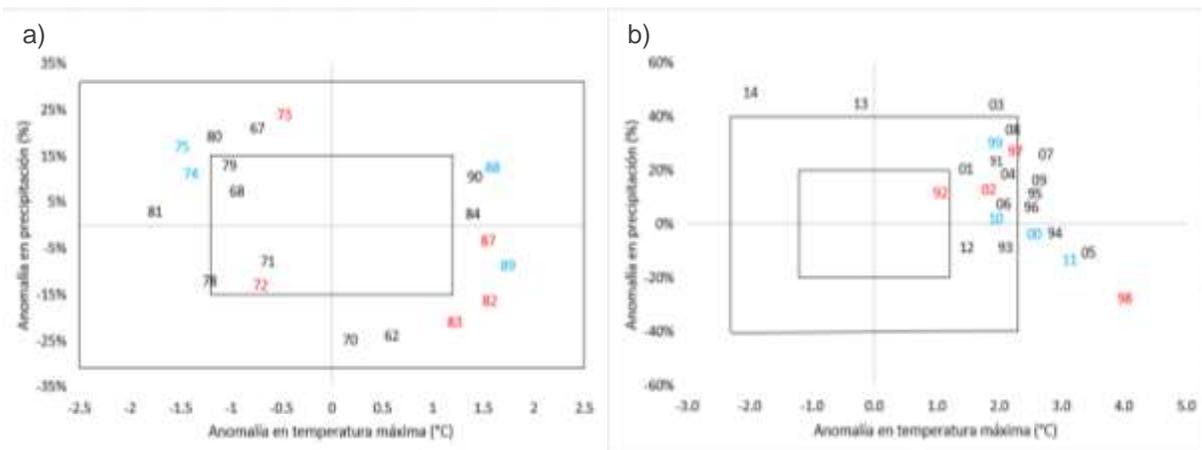


Figura 15. Espacios de riesgo para Tlaxco: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014).

7.2.5 Espacios de riesgo de la estación de Zitlaltepec

La serie de tiempo de esta estación presentó relativamente pocos datos, destacando 1982 y 1987, años de EL NIÑO, con sus anomalías positivas en temperatura de hasta 0.5°C, y en precipitación un intervalo de -25% y 25% (figura 16a). En el periodo actual la mayoría de los años se concentra en anomalías positivas de 1°C y 2.5°C, se presentaron anomalías en precipitación en un intervalo de -40% y 40% (figura 16b).

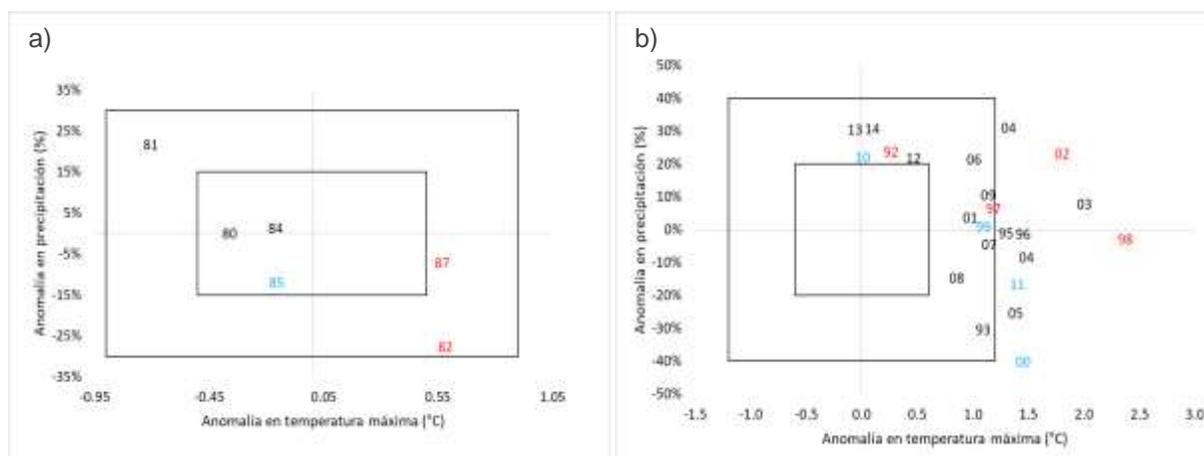


Figura 16. Espacios de riesgo para Zitlaltepec: a) periodo de referencia (1961-1990); b) periodo actual (1991-2014).

Tabla V. Anomalías de precipitación y temperatura para el periodo base con una y dos desviaciones estándar

Estación climatológica	Una desviación		Dos desviaciones	
	PCP (%)	Tmáx (°C)	PCP (%)	Tmáx (°C)
Calpulalpan	19	0.5	38	1
Huamantla	18	1.1	36	2.1
Terrenate	22	0.5	43	1.1
Tlaxco	15	1.2	31	2.5
Zitlaltepec	15	0.5	30	0.9

PCP: precipitación; Tmáx: temperatura máxima; %: porcentaje; °C: grados centígrados

Tabla VI Anomalías de precipitación y temperatura para el periodo actual con una y dos desviaciones estándar

Estación climatológica	Una desviación		Dos desviaciones	
	PCP (%)	Tmáx (°C)	PCP (%)	Tmáx (°C)
Calpulalpan	16	2.4	32	4.7
Huamantla	20	0.7	40	1.5
Terrenate	17	1.7	33	3.3
Tlaxco	20	1.2	40	2.3
Zitlaltepec	20	0.6	40	1.2

PCP: precipitación; Tmáx: temperatura máxima; %: porcentaje; °C: grados centígrados

7.3 Zonificación de distribución potencial

Con los mapas de altitud, pendientes, tipos de suelo en el estado de Tlaxcala y de Uso del Suelo y Vegetación del estado de Tlaxcala figuras 17, 18, 19 y 20), además en conjunto de los resultantes de isoyetas e isotermas realizados para cada escenario, se realizó una intersección para obtener un solo mapa y realizar la zonificación de acuerdo al cuadro de requerimientos.

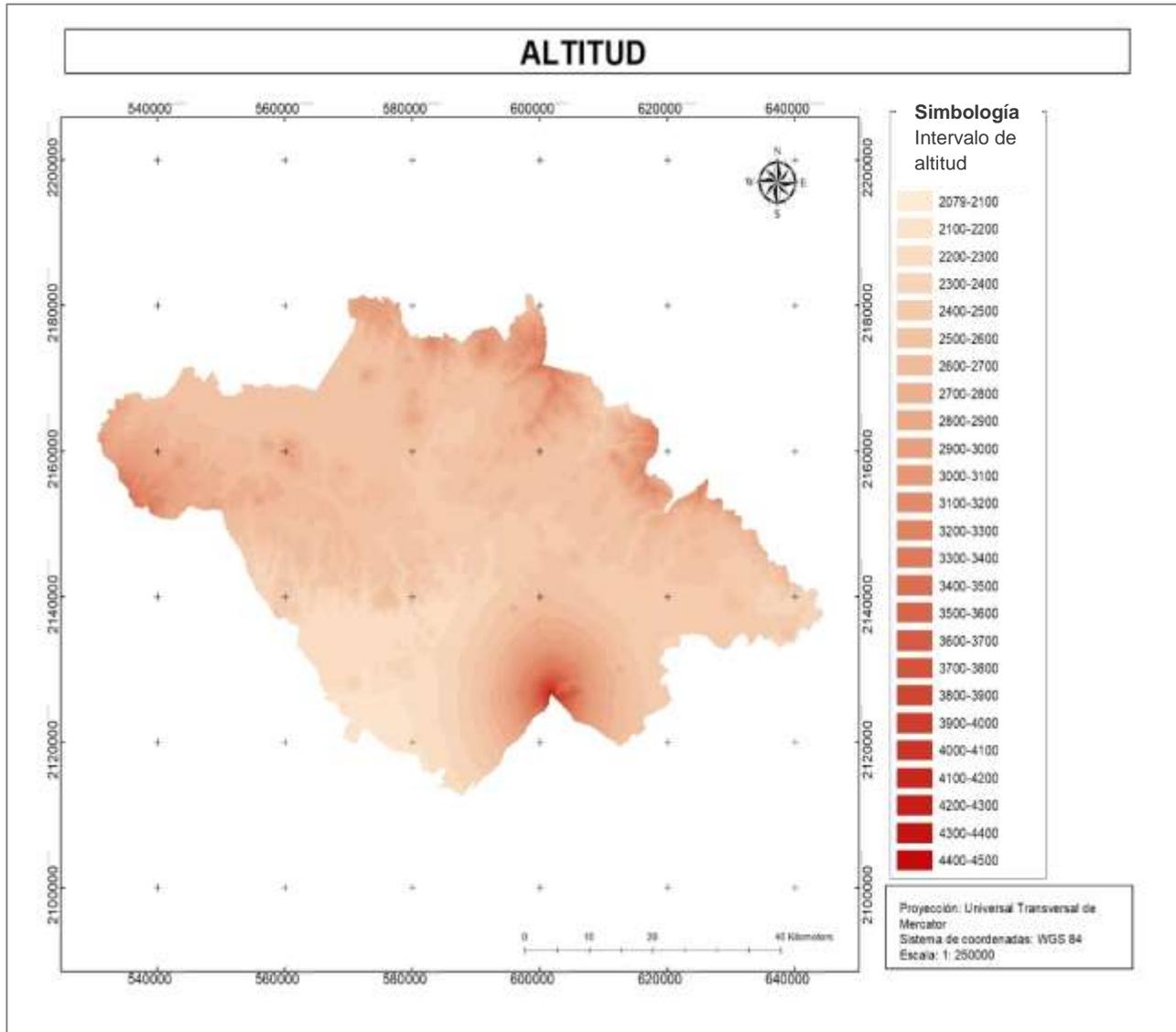


Figura 17. Mapa de altitud del estado de Tlaxcala con clasificación cada 100 metros.

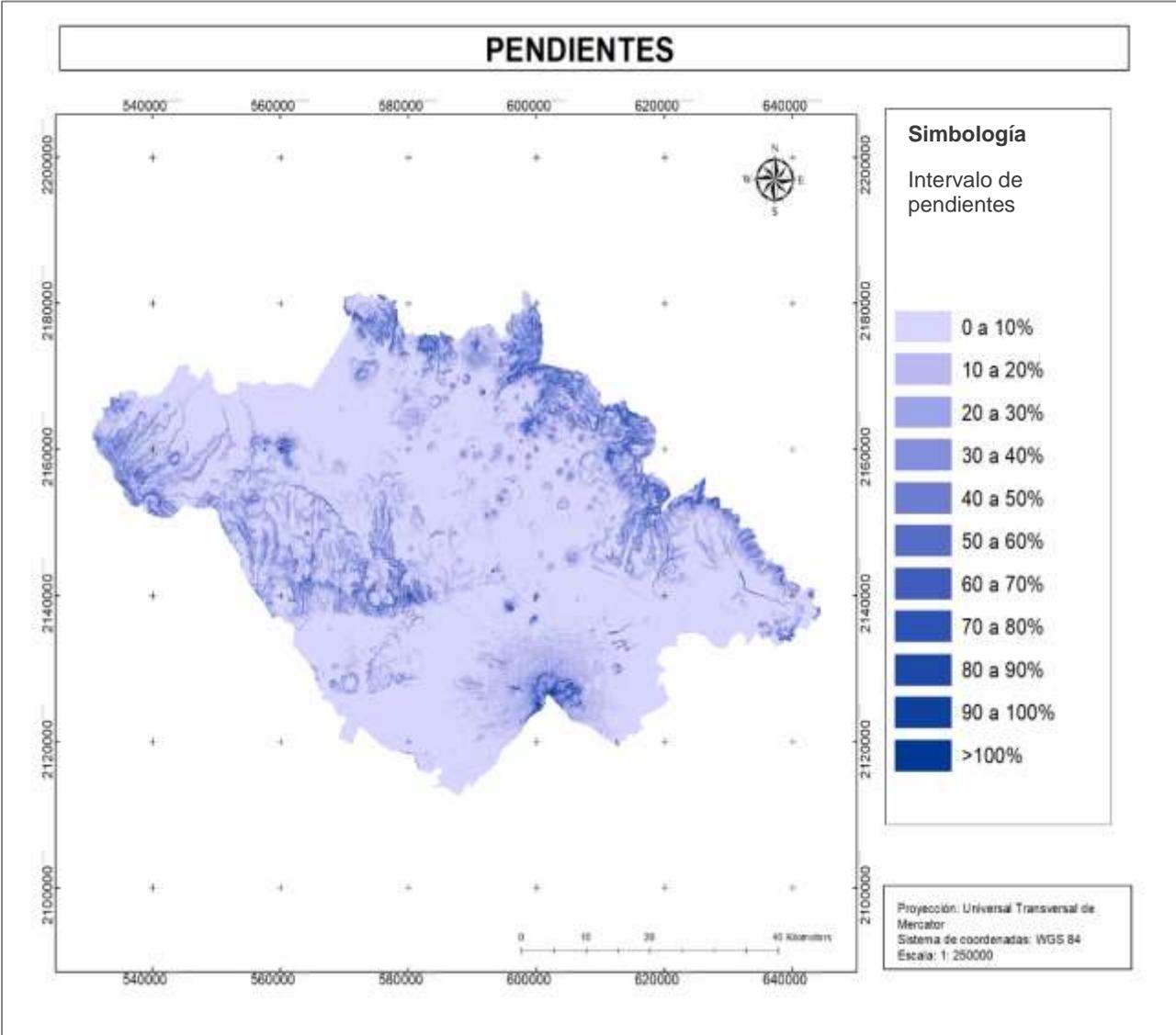


Figura 18. Mapa de pendientes para el estado de Tlaxcala, clasificado en porcentaje.

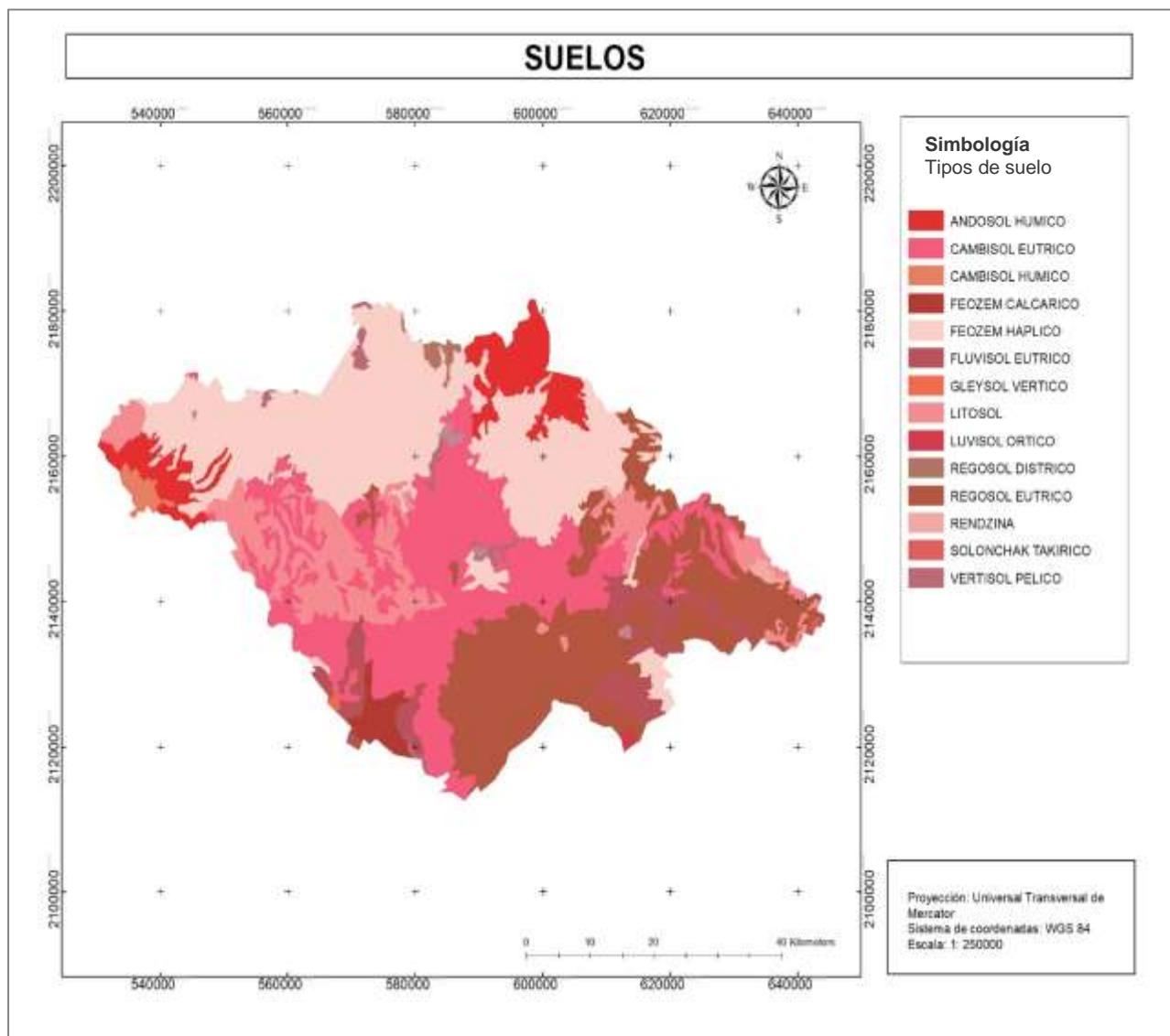


Figura 19. Mapa de tipos de suelo en el estado de Tlaxcala.

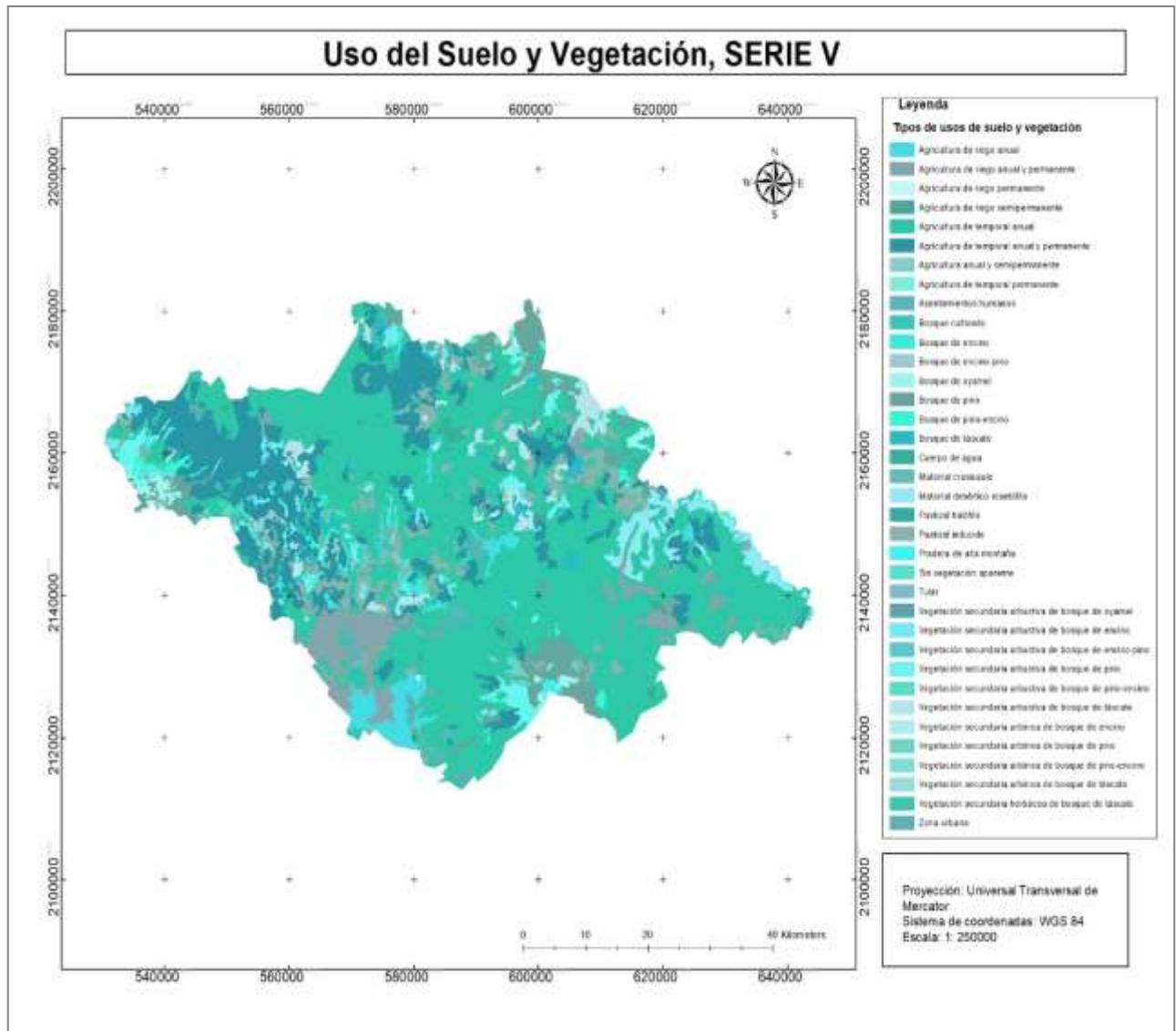


Figura 20. Mapa de Uso de suelo y vegetación en el estado de Tlaxcala

7.3.1 Zonificación de la distribución potencial actual de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.

De acuerdo a la zonificación de la distribución potencial actual (figura 21), de las 394,835 ha que tiene el estado de Tlaxcala, se obtuvo una superficie de 3821 ha con potencial alto para el desarrollo de *A. religiosa* que corresponde a un 0.97% de la superficie total del Estado, 1841 ha (0.47%) con potencial moderado y 3723 ha (0.94%) con potencial bajo. Los mapas de isoyetas e isotermas (figura 21), obtenidos de los análisis de los datos de temperatura y precipitación obtenidos del USDA, se obtuvieron valores temperatura en un intervalo entre 4°C y 17°C y en precipitación un intervalo entre 500 y 1500 mm (figura 22).

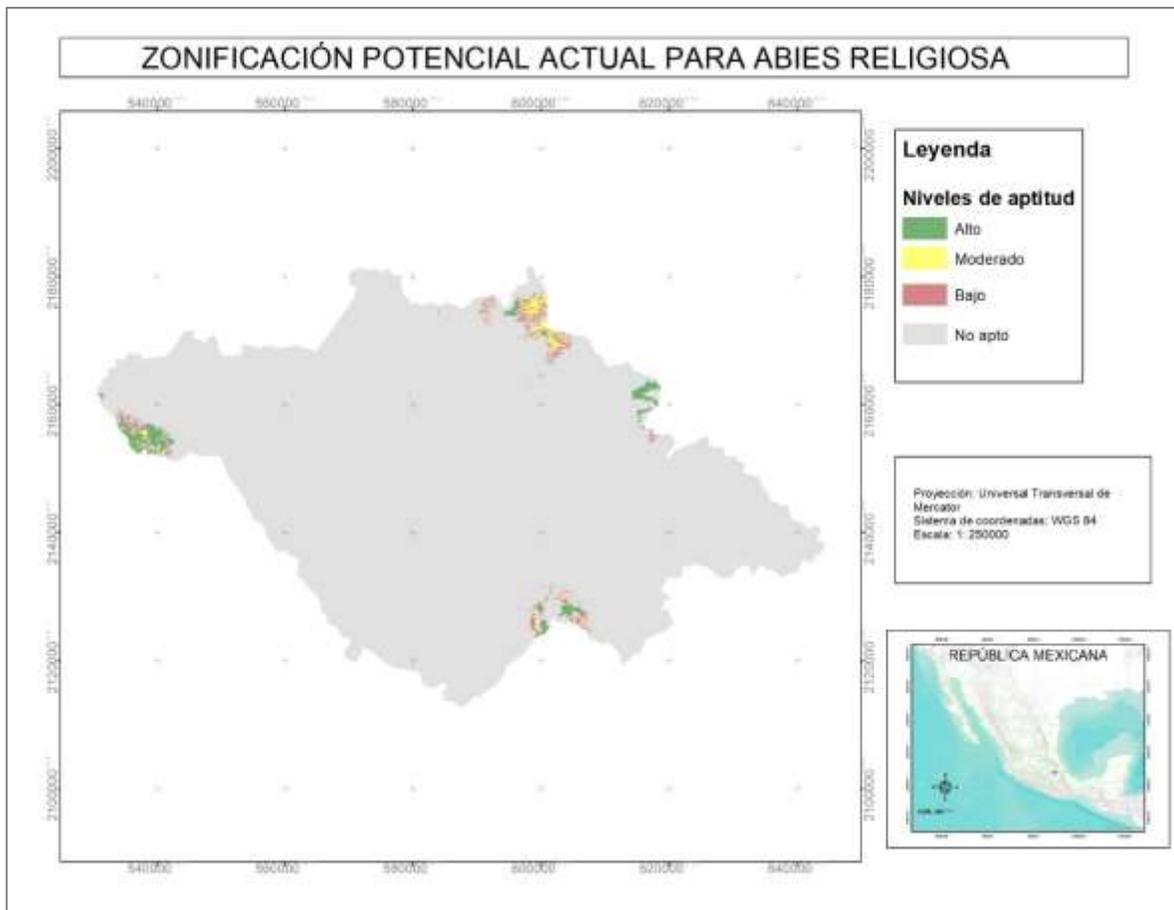


Figura 21. Mapa de distribución potencial de *A. religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. para el escenario base

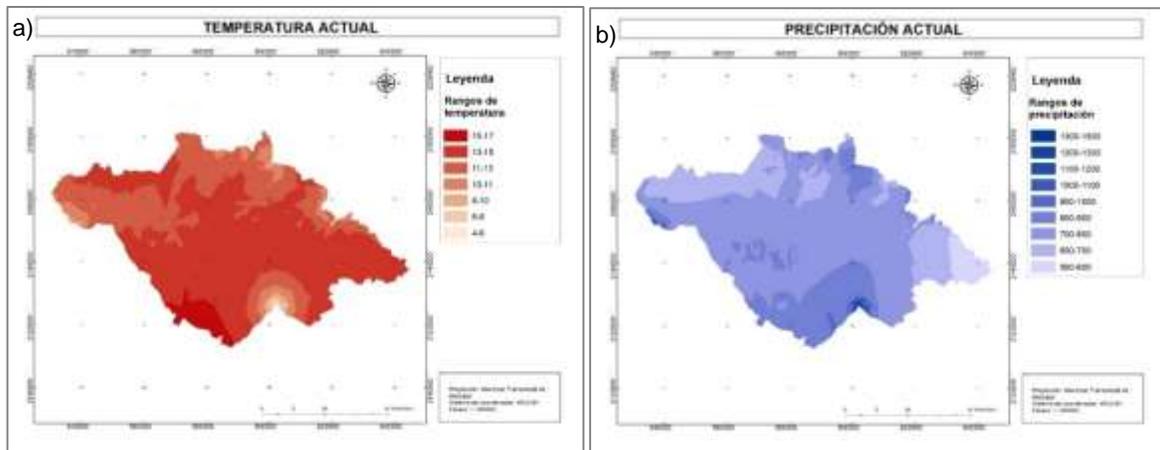


Figura 22. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el mapa base

7.3.2 Zonificación de la distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham. aplicando el escenario RCP4.5, año 2030

Bajo el escenario RCP 4.5 para el año 2030 se obtuvo una superficie con potencial alto 2411 ha, de la superficie total, para el potencial moderado se obtuvo una superficie de 1552 ha, y bajo potencial 2395 ha lo que representan 0.61%, 0.39% y 0.61% del estado de Tlaxcala. Se obtuvo que la Malinche presentan mayor superficie con condiciones óptimas para el desarrollo de la especie, Calpulalpan y Tlaxco obtuvieron menos superficie con estas condiciones. Se calculó la tasa de cambio respecto a la superficie base, se obtuvo un cambio de 37% para el potencial alto, 16% con respecto a potencial moderado y 36% para bajo potencial (figura 23). Esto indica que hay una disminución en la superficie con condiciones óptimas para el desarrollo de la especie, lo cual puede poner en peligro a esta especie. El intervalo de precipitación es de 500 a 1500 mm y de temperatura es de 5 a 19°C, un aumento de 2°C, respecto al mapa base (figura 24).

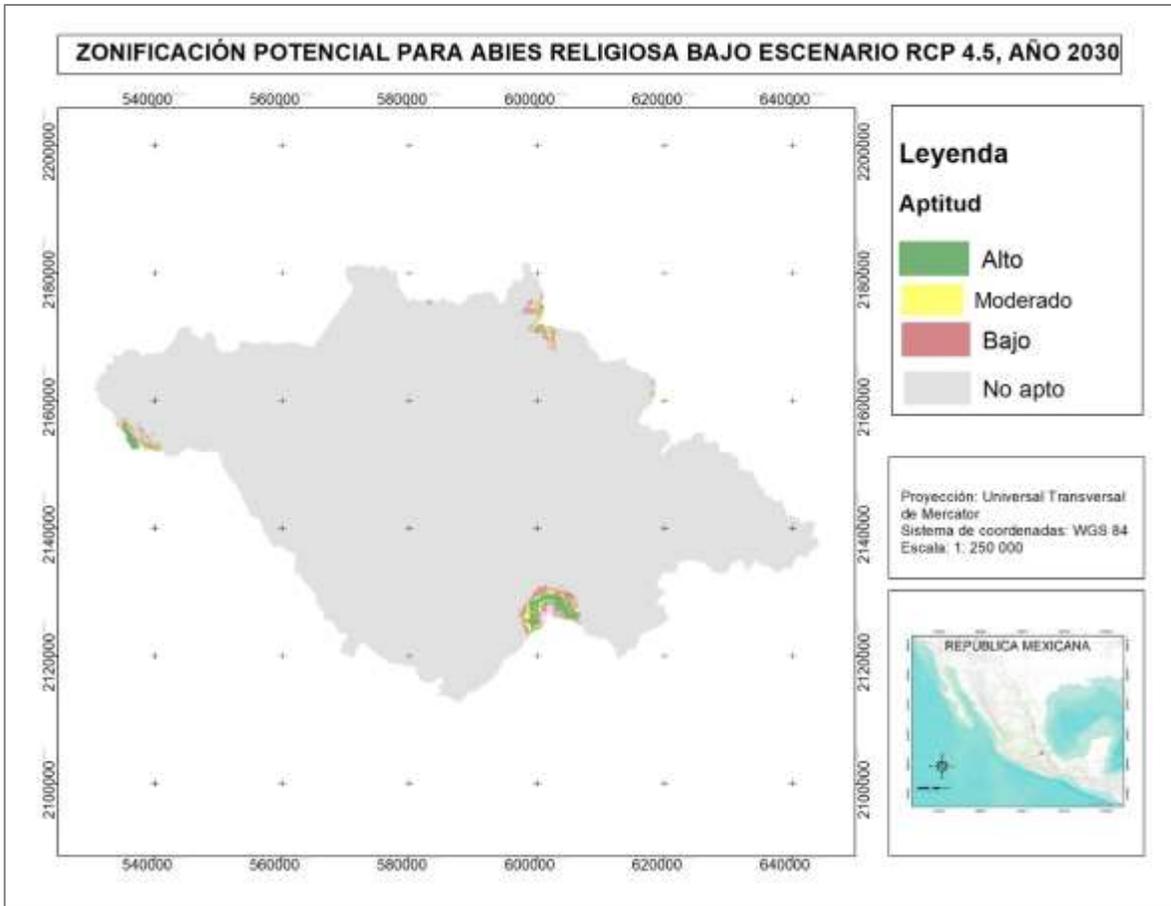


Figura 23. Mapas de distribución potencial de *A. religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. bajo el escenario RCP4.5, modelo HadGEM2ES, para el año 2030

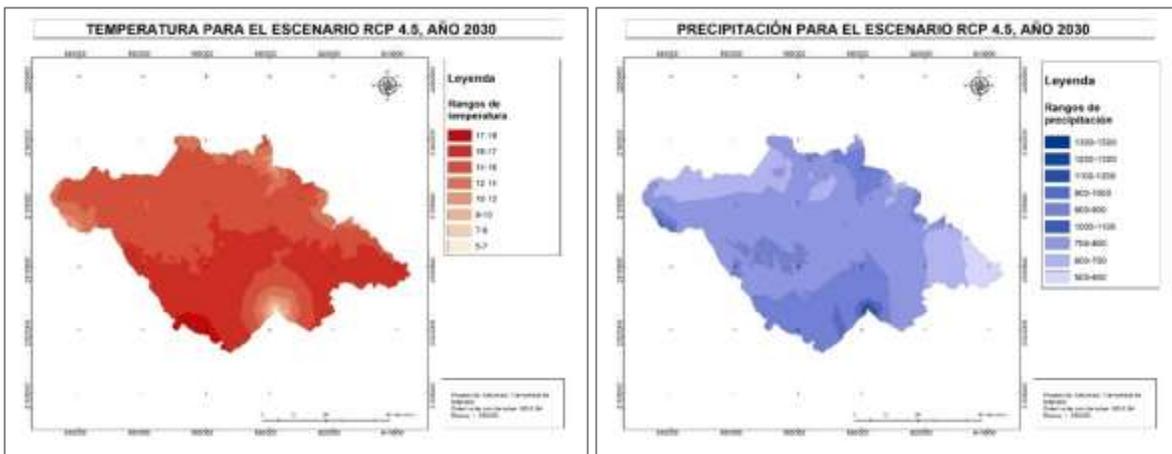


Figura 24. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP 4.5, para el año 2030

7.3.3 Zonificación de la distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. aplicando el escenario RCP6.0, año 2030

Bajo el escenario RCP6.0 para el año 2030 se obtuvo una pérdida 63% con respecto al mapa base, teniendo una superficie de 1416 ha con potencial alto, 1214 ha con potencial moderado y 1745 ha bajo potencial. Siendo 0.36%, 0.31%, 0.44% respectivamente de la superficie total del estado de Tlaxcala. Se obtuvo una pérdida de superficie de 63% con condiciones óptimas, un 34% con condiciones moderadas y un 53% con condiciones con bajo potencial. Se tiene una temperatura de 5°C a 19°C, lo cual puede indicar la pérdida de superficie (figura 25),

El intervalo de precipitación es de 400 a 1400 mm y de temperatura es de 5 a 19°C (figura 26), hay un aumento en temperatura y una disminución de 100mm de precipitación. Estos cambios en las variables se ven reflejados en la disminución de superficie apta.

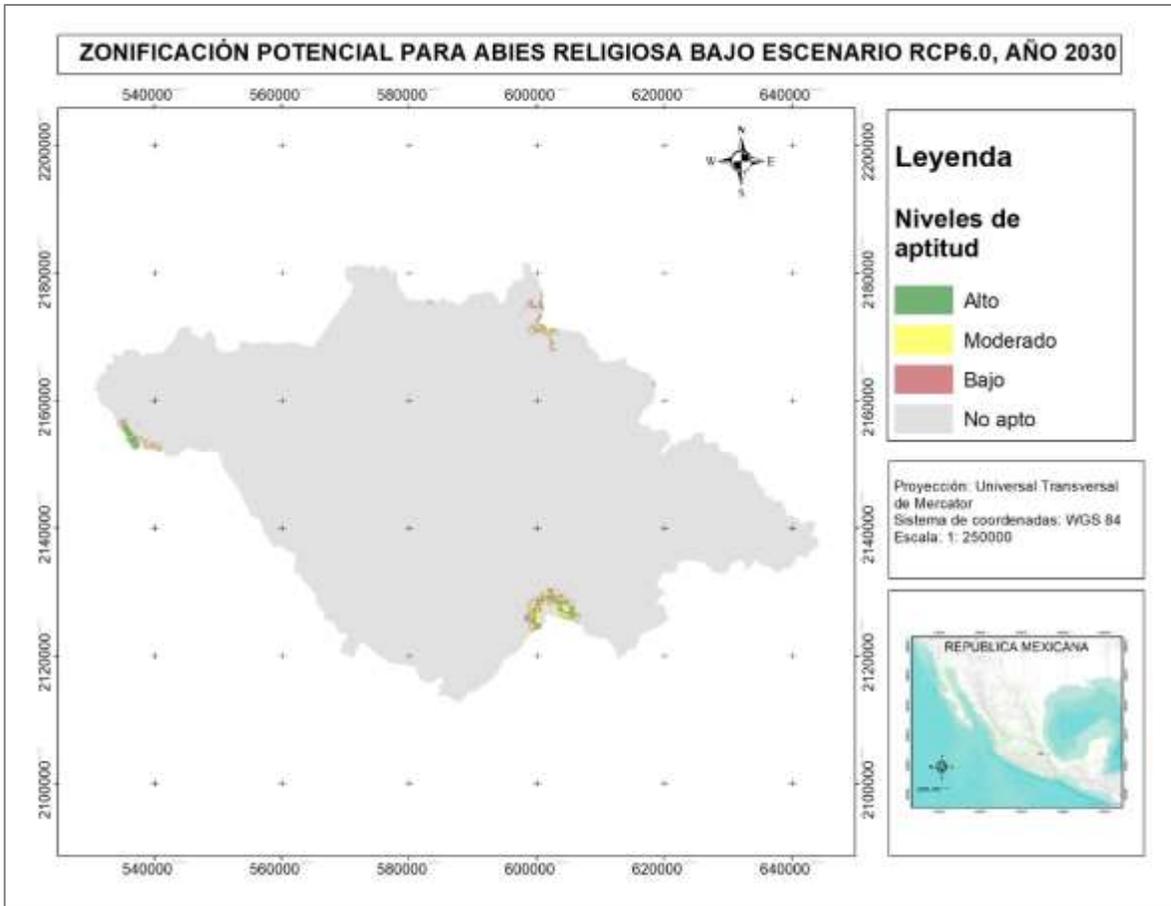


Figura 25. Mapas de distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. bajo el escenario RCP6.0, modelo HadGEM2ES, para el año 2030

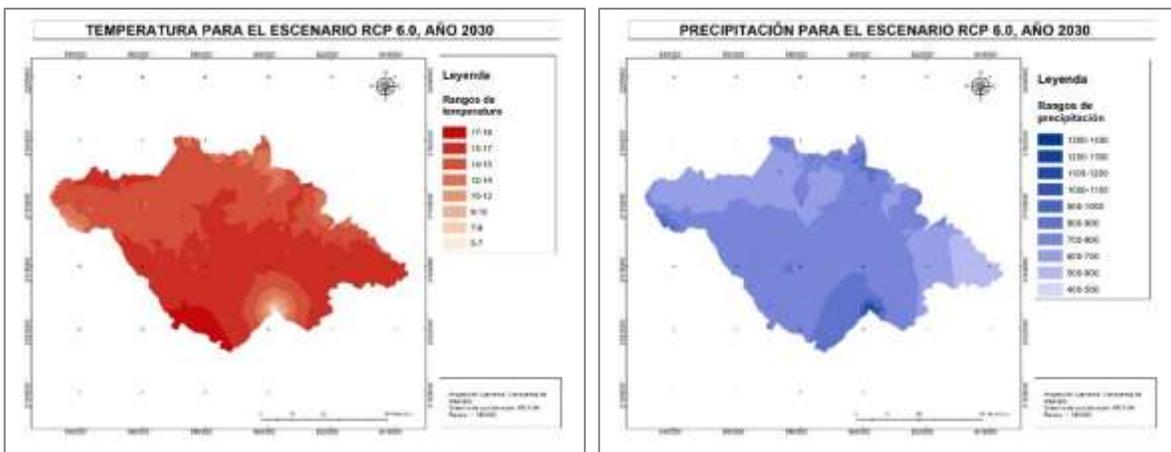


Figura 26. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP6.0, año 2030

7.3.4 Zonificación de la distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. aplicando escenario 4.5, año 2060

En la zonificación del escenario RCP4.5 para el año 2060 se obtuvo un intervalo en precipitación de 500 a 1500 y de temperatura de 7 a 21 (figura 27), teniendo un aumento de 4°C con respecto al mapa base. Lo cual puede explicar porque se obtuvo una disminución de la con condiciones óptimas que corresponde a 1504 ha lo que representa un 0.38%, moderado con 1363 ha con un 0.35% y bajo potencial con 1942 ha que corresponde a un 0.49% de la superficie total de Tlaxcala (figura 28). La tasa de cambio respecto a la superficie del mapa base para el potencial alto es de 61%, 26% para potencial moderado y 48% para potencial bajo.

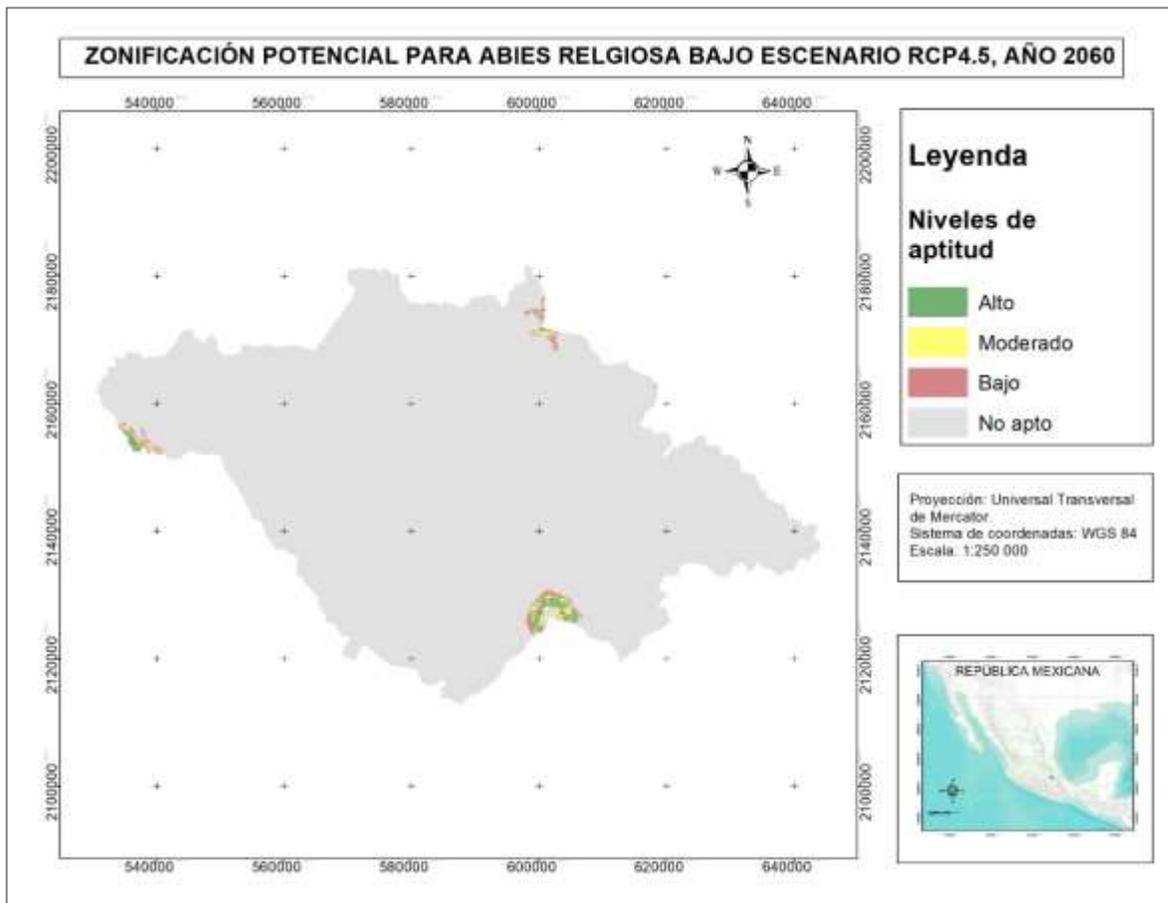


Figura 27. Mapas de distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. bajo el escenario RCP4.5, modelo HadGEM2ES, para el año 2060

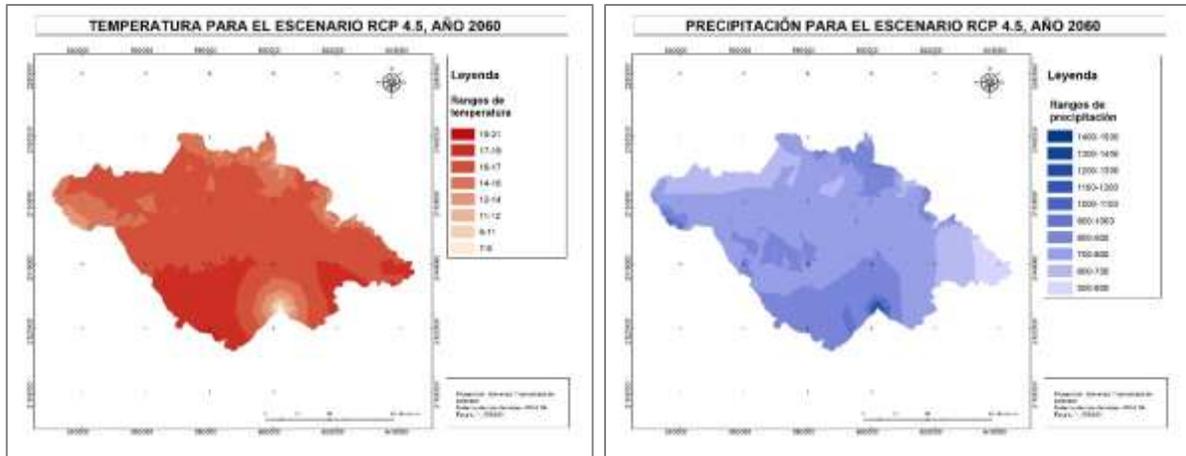


Figura 28. Mapa de isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RCP4.5, año 2060

7.3.5 Zonificación de la distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. aplicando el escenario RCP6.0, año 2060

Para el escenario RCP6.0 se obtuvo una superficie para potencial alto de 1729 ha, con un 0.44% para moderado 1345 0.34% ha y potencial bajo 1762 ha 0.45% (figura 29). La tasa de cambio respecto a la zonificación del mapa base para potencial alto es de 55%, potencial moderado de 27% y 53% para potencial bajo. En este escenario se obtuvo mayor superficie que en los otros escenarios. En precipitación se obtuvo un intervalo de 500 a 1600 mm y de temperatura de 7 a 20°C (figura 30). Al igual que los demás escenarios, La Malinche es la que presenta mayor superficie con condiciones óptimas, y la zona de Tlaxco presenta una reducción en los tres niveles de potencial.

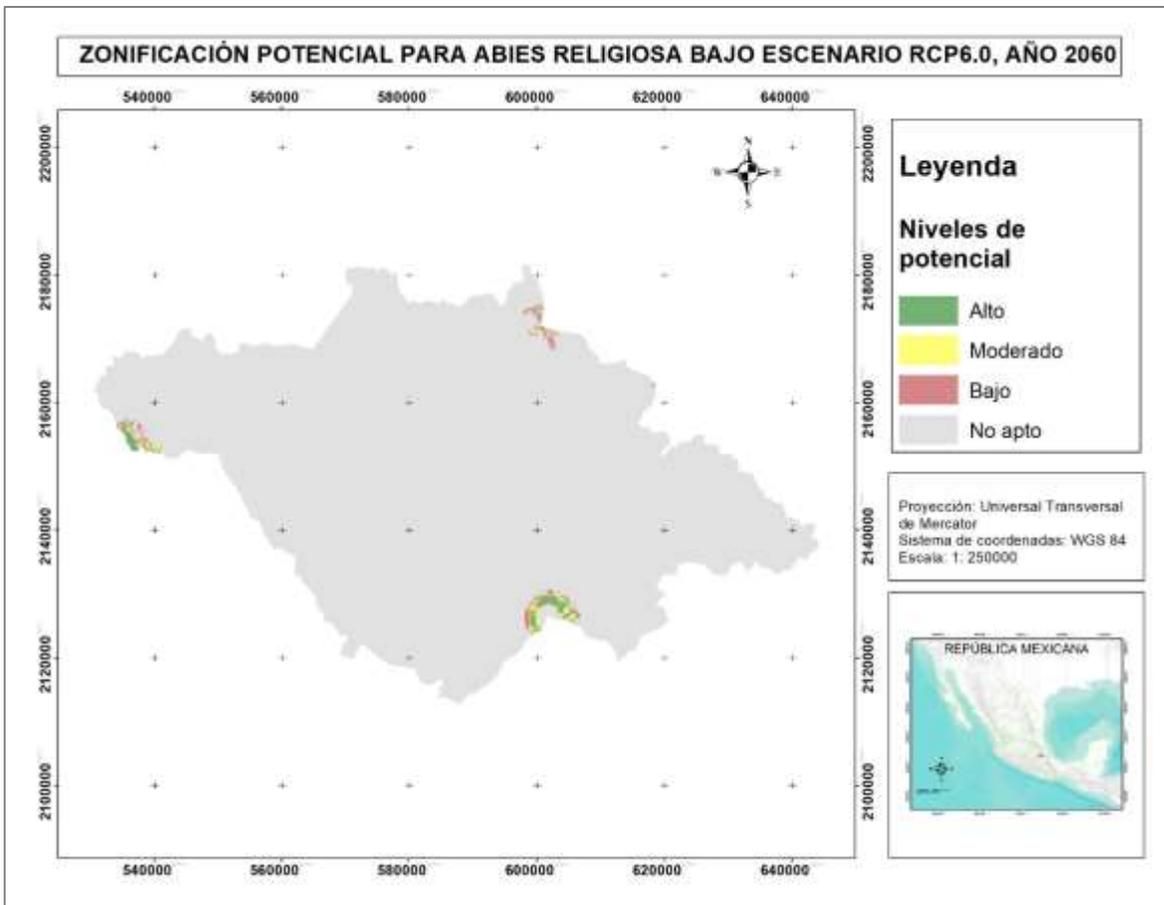


Figura 29. Mapas de distribución potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. bajo el escenario RCP6.0, modelo HadGEM2ES, para el año 2060

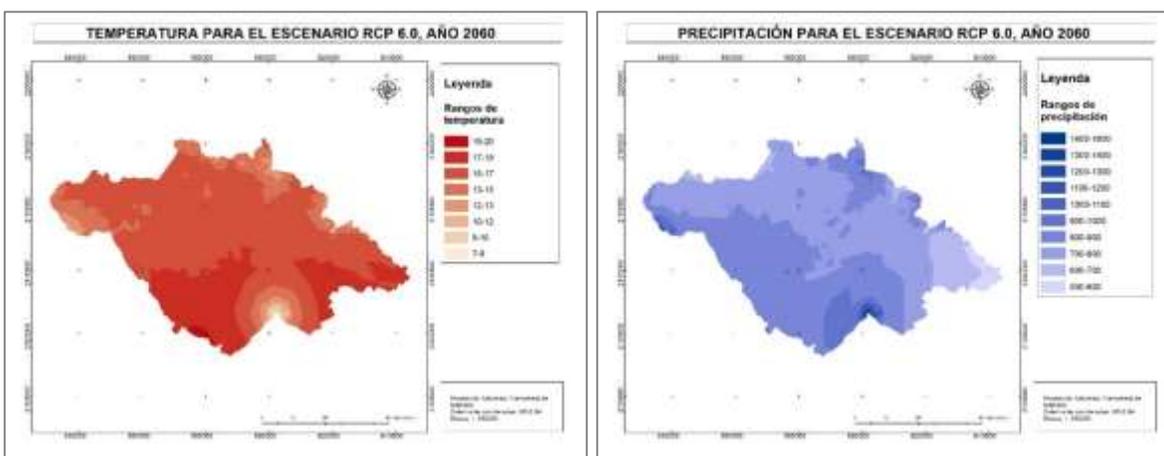


Figura 30. Mapa de isotermas e isoyetas en el estado de Tlaxcala para el escenario RC6.0, año 2060

Tabla VII. Superficie en hectáreas de niveles de aptitud en el estado de Tlaxcala bajo escenarios de cambio climático.

Aptitud	Escenario actual	2030		2060	
		RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 6.0
Alto	3821	2411	1416	1504	1729
Moderado	1841	1552	1214	1363	1345
Bajo	3723	2395	1745	1942	1762
No apto	385450	388396	390315	389965	389891

RCP: Trayectorias Representativas de Concentración de emisiones bajas (RCP 4.5 W/m²) y escenario de estabilización de emisiones (RCP 6.0 W/m²) para los años 2030 y 2060

En la tabla VIII se muestran las superficies obtenidas de acuerdo a los escenarios, los resultados muestran una pérdida de áreas potenciales en todos los escenarios aplicados, se perderán áreas con potencial alto y moderado, y en algunos escenarios aumentarán las áreas con bajo potencial para el desarrollo de la especie. En la tabla IX se muestran las tasas de cambio de cada escenario con respecto a la zonificación del mapa base.

Tabla VIII. Porcentaje de cambio de los escenarios de cambio climático respecto al escenario base

Aptitud	2030		2060	
	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 6.0
Alto	37%	63%	61%	55%
Moderado	16%	34%	26%	27%
Bajo	36%	53%	48%	53%

En todos los escenarios utilizados se obtuvo una reducción de la superficie con condiciones óptimas para el establecimiento de la especie, por lo que de acuerdo a Sáenz (2011), sugiere como estrategia de adaptación al cambio climático, realizar recolecta de semillas de la especie a reforestar y subir la semilla el máximo de ancho de la zona, a partir del sitio de recolecta, lo cual se sugiere subir siempre 300 metros de altitud, considerando que para el año 2030 la temperatura aumentara 1.5°C, considerando que por cada 100 metros de altitud la temperatura desciende 0.5°C.

Sin embargo, al momento de realizar el movimiento de semillas hay que tomar en cuenta las variables de requerimientos ecológicos que necesita la especie, como tipo de suelo, pendiente, temperatura Sáenz (2011).

8. DISCUSIÓN

Los resultados muestran evidencia del cambio climático, la cual se ve reflejada en los datos observados, así como en la zonificación de *Abies religiosa*. Los resultados del análisis con RCLimDex indican una modificación en el clima, a partir de 1991 con un aumento de temperatura. De acuerdo con el PEACC (2014), estas variaciones climáticas repercuten en la modificación espacial y temporal del ciclo hidrológico, sobre todo en la evaporación y en la precipitación, tendiendo así impacto sobre la cobertura vegetal.

El cambio climático, así como la variabilidad climática presentada en los resultados, indican que puede haber efectos directos sobre el bosque, ya que se observan cambios importantes en los índices de precipitación y temperatura.

De acuerdo con diversos estudios que modelan la distribución de la vegetación aplicando modelos de circulación general y escenarios de cambio climático, en el cual el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero promoverá cambios en la vegetación. Uno de ellos es el realizado por Villers y Trejo (2000), reportan que en años futuros habrá disminución en la precipitación y aumento de la temperatura, lo que en conjunto favorecerá el establecimiento de comunidades tropicales, restando terreno a bosques templados de encino y de coníferas establecidos en climas templados y semifríos; por lo cual habrá un desplazamiento de la vegetación.

Este trabajo realizado mostró que cambios en las variables climáticas pueden tener efectos en la distribución y superficie de *A. religiosa*, ya que se obtuvo que gran parte de la superficie se verá afectada con una reducción más del 50% en el área con condiciones óptimas para el desarrollo de la especie. Sáenz *et al.* (2012) encontró una reducción en la superficie, por lo que menciono que el hábitat adecuado para *A. religiosa* ocurrirá a altitudes cada vez mayores a lo largo del Cinturón Volcánico Transmexicano. Así mismo Chávez *et al.* (2014) reporta que la sensibilidad de las zonas de transición bioclimática frente a pequeños cambios en la precipitación y temperatura, confirma la importancia de su delimitación, ya que obtuvieron que un incremento de temperatura, provocando que se ubiquen en regiones latitudinales más cálidas y regiones de humedad más secas. A su vez

coincide con lo señalado por Picazo *et al.* (2015); quienes indican que cambios en las variables de precipitación y temperatura tendrán repercusiones en diferentes especies arbóreas que se encuentran confinadas a sistemas montañosos, las cuales son las más sensibles al cambio climático, ya que experimentarían cambios que afectará su distribución, extensión, desaparecerá o migrará a otras áreas.

Sin embargo, en los resultados también se encontró que para el año 2060 bajo el escenario 6.0 la superficie apta para el desarrollo de la especie aumenta respecto al escenario 4.5, similar al trabajo realizado por Pérez *et al.* (2017) donde reportan para el Eje Neovolcánico para el escenario RCP4.5 en el año 2039 un aumento de superficie para el desarrollo del oyamel, ya que la presencia del oyamel tiende a distribuirse hacia las partes altas, también recomiendan generar información cartográfica de escala menor para visualizar la realidad de manera regional, tal como se realizó en este trabajo. Aunque utilizaron diferentes metodologías, todos concuerdan que cambios en las variables de precipitación y temperatura tendrán repercusiones en diferentes especies arbóreas que se encuentran confinadas a sistemas montañosos, las cuales son las más sensibles al cambio climático, ya que experimentarían cambios que afectará su distribución, extensión.

En el PEACC (2014) y en el Plan Estatal de Desarrollo Tlaxcala 2011-2016, se hace énfasis en realizar acciones encaminadas al cuidado del medio ambiente lo que implica preservar nuestros recursos naturales. Este trabajo contribuye con estas acciones para enfrentar el cambio climático mediante la instrumentación de programas y acciones de adaptación y mitigación. En Tlaxcala se propone la realización de políticas de mitigación que estén orientadas a contribuir a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, actuando en los campos de energía, sustituyendo el uso de combustibles fósiles por energías alternativas, la modernización de la industria, la conservación y renovación de los bosques, la tecnificación de la actividad agropecuaria y otras fuentes que están propiciando el cambio climático a nivel internacional (PEACC, 2014).

Debido a que el cambio climático genera un desfase entre los genotipos y la adaptación de las poblaciones, algunas de las medidas de mitigación es la

migración asistida propuesta por Sáenz (2011), la cual consiste extraer semillas de poblaciones y moverla latitudinalmente hacia arriba 300 metros de altitud, está basada para el 2030, debido a que la temperatura aumentara 1.5°C, ya que por cada 100 metros la temperatura aumentara 0.5°C. Sáenz *et al.* (2012) reportaron que el área de nicho ecológico ocupada por *A. religiosa* disminuirá en un 69.2% para el 2030, 87.6% para el 2060, y 96.5% para el 2090, igualmente las proyecciones muestran que para fines de siglo, el hábitat adecuado para la mariposa monarca ya no podrá encontrarse dentro de la Reserva de la Biosfera.

9. CONCLUSIONES

En las corridas de RClimDex tres de las cinco estaciones analizadas mostraron un aumento en la tendencia de las temperaturas máximas como mínimas. En las estaciones hay una tendencia tanto al aumento como a la baja, sin embargo, la precipitación máxima en un día va en aumento para la mayoría de las estaciones. En todas las estaciones excepto Huamantla la temperatura máxima extrema va en aumento y la temperatura mínima extrema mostró tanto aumento como disminución en todas las estaciones. Cabe mencionar que en todas las estaciones mostraron impactos diferenciados, esto se le adjudica a que cada estación cuenta con diferentes forzantes.

Los espacios de riesgo evidencian y refuerzan las teorías referentes al cambio climático, ya que muestran aumento en los días secos consecutivos, otra conclusión que se desprende del análisis presentado es la firma de cada lugar confirmando un impacto diferenciado en cada lugar, ejemplo de ello es la incidencia de incendios tras una sequía prolongada y temperaturas extremas en 1998 como lo muestran los espacios de riesgo.

Existen diferencias en la superficial potencial de distribución de *A. religiosa* para cada uno de los escenarios. Se señala un posible impacto del cambio climático en los bosques de *A. religiosa*, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos en la zonificación, se obtuvo una reducción de la superficie en la que la especie se puede desarrollar, con lo que se prueba la hipótesis de trabajo.

Los escenarios concuerdan en que el clima será más cálido en años futuros, habrá una disminución en la precipitación, proyectando un impacto mayor en el escenario RCP6.0 para el año 2030, ya que presentó una reducción del 37%. Sin embargo, se identificó que en la zona de la Malinche se presentan áreas con mejor aptitud para el desarrollo de *A. religiosa*, esto puede ser una opción de hábitat en un futuro para garantizar la perpetuación de la mariposa monarca. Es importante mencionar que las proyecciones de los escenarios sobre el impacto en la especie mantienen un alto grado de incertidumbre, ya que algunos cambios en las variables utilizadas pueden generar resultados distintos. Sin embargo, la información es de utilidad para

la orientación de los tomadores de decisiones así como responsables de las políticas, estrategias y medidas de adaptación ante el cambio climático.

Considerando los efectos potenciales del cambio climático sobre las especies forestales, es necesario considerar acciones que estén encaminadas a la adaptación y mitigación. Una de ellas es el ajuste de programas de germoplasma forestal, reforestación y plantaciones comerciales a un contexto de cambio climático establecido por Sáenz (2014). Así como un manejo forestal flexible y adaptativo que tenga en cuenta todos los escenarios posibles y permita además considerar múltiples opciones de uso, sería la alternativa más adecuada.

El análisis de la vulnerabilidad que tiene el *Abies religiosa* ante el cambio climático permitirá implementar medidas de conservación y adaptación, ya que de acuerdo a los resultados y la literatura citada, una de las opciones más factibles para combatir el impacto del cambio climático es la implementación de la migración asistida tal como lo menciona Sáenz (2011), siendo La Malinche un Parque Nacional habrá mayor oportunidad de aplicar estas estrategias de adaptación al cambio climático.

10. LITERATURA CITADA

- Chávez, Á. A., Flores, H. E., De la Mora, C., Ruíz, J. A., Ramírez, G. y Rubio, E. (2014). Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2021-2033.
- CMNUCC. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*.
- Collado, J. C., y Navarro, J. M. (2013). *ArcGis 10. Prácticas paso a paso. Introducción al ArcMap Y ArcCatalog*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. y Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 1051-1075.
- CONAFOR. (2003). *Abies religiosa (Kunth Schltld. et cham.)*. Ficha técnica. CONABIO. SIRE.
- CONAFOR. (2013a). *Bosques, cambio climático y REDD+ en México*. Zapopan, Jalisco. México: CONAFOR.
- CONAFOR. (2013b). El bosque de oyamel de Nanacamilpa, hábitat de las luciérnagas.
- Conde, A. C., Enriquez, G., Esquivel, N., López, J., López, F., Montes, R., Nava y Ruiz, K. (2016). Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. En A. C. Conde y J. López, *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para Métodos de Evaluación* (págs. 25-72). México: INECC.

- Conde, A. C., Ferrer, R. y Orozco, S. (2006a). Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*, 181-194.
- Conde, A. C., Vinocur, M., Guy, C., Seiler, R. y Estrada, F. (2006b). Climatic Threat Spaces as a Tool to Assess Current and Future Climate Risks: Case Studies in Mexico and Argentina. *AIACC Working Papers*.
- Conde, C. (2006). *México y el cambio climático global*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.
- Cruz, G., López, L., Silva, J., Bernal, N., Estrada, F. y López, J. A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacan. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 135-148.
- Economía del cambio Climático. (2017). Mecanismos de Mitigación. Curso en Línea: Mercados de carbono: una forma de mitigar el cambio climático*. Tecnológico de Monterrey.
- Estrada, I., Equihua, M., Castillo, G., y Rojas, O. (2015). Climate change and effects on vegetation in Veracruz, Mexico: an approach using ecological niche modelling. *Acta Botanica Mexicana*, 73-93.
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*.
- FAO. (2013). *Directrices sobre el cambio climático para los gestores forestales*. Estudios FAO Montes Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Felicísimo, Á., Muñoz, J., Mateo, R. YVillalba, C. (2012). Vulnerabilidad de la flora y vegetación españolas ante el cambio climático. *Ecosistemas*, 1-6.
- Fernández, A., Zavala, J., Romero, R., Conde, A. C. y Trejo, R. I. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de*

impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Forestal, C. N. (2013). *Bosques, cambio climático y REDD+ en México*. Zapopan, Jalisco. México: CONAFOR.

García, Y. B. y Sierra, A. E. (2014). *Manual de zonificación ecológica de especies forestales y aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático 2014-2018*. CONAFOR.

Gutiérrez, E. y Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque tempado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 179-188.

IEF. (2015). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos Tlaxcala*. SEMARNAT, CONAFOR. Primera edición .

INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000 Serie V*.

INEGI. (2016). *Modelos Digitales de Elevación (MDE)*. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. [Consultado el: 25 de mayo del 2016]. .

INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017*. México. Recuperado de: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825096212>. [Consultado el 15 de enero del 2018].

IPCC. (2014). *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC ¿Qué implica para Latinoamérica? Resumen ejecutivo*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Lucero, S. R. (2013). *Modelamiento a través de un SIG para la zonificación agroecológica de los principales cultivos (papa, maíz, brócoli, cebolla blanca, cebada y pasto) dentro de la parroquia de Alóag*. Tesis de Maestría en

Sistemas de Información Geográfica. Colegio de Postgraduados.
Universidad de San Francisco de Quito.

Magaña, V. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En A. Fernández y J. Martínez, *Cambio Climático: una visión desde México* (págs. 17-27). México: SEMARNAT-INE.

Magaña, V. y. (2010). Detección y atribución de cambio climático a escala regional . *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 73-82.

Mancebo, S., Ortega, E., Valentín, A. C., Martín, B. y Martín , L. (2008). *LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental.* Madrid, España.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E. y Carter, T. (2008). *Towards new scenarios for analysis of emissions climate change, impacts and response strategie. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva: IPCC.

PEACC. (2014). En T. Morales y R. Bernal, *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático.* Tlaxcala, México: UATx.

Pérez, R., Moreno, F., González, A. y Arriola, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et. Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 18-33.

Pérez, R., Romero, M. E., González, A., Pérez, E. y Flores , E. (2017). Distribución del *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham. bajo escenarios de cambio climático en el Eje Neovolcánico, México. *Agroproductividad*, 29-34.

Picazo, E. J., Leyva, J. C., Zamora, P. y Martínez, J. (2015). Zonificación ecológica de *Pinus oaxacana* Mirov y aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 29-39.

Puerta, R., Rengifo, J. y Bravo, N. (2011). *ArcGis Básico 10.* Perú: Universidad Nacional de la Selva: Facultad de Recursos Naturales Renovables.

- Quintana, F. (2016). Bosques, comunidades forestales y cambio climático. En J. C. Rueda, C. Gay y F. Quintana, *21 Visione de la COP 21. El acuerdo de París: retos y áreas de oportunidad para su implementación en México* (págs. 69-78). México: UNAM.
- Romero, M. E. (2016). Escenarios de Cambio Climático en el sector forestal . *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4-6.
- Rzedowski. (1994). Capitulo 18. Bosque de Coníferas. En *Vegetación en México* (págs. 302-310). Limusa.
- Rzedowski, J. (2006). Capitulo 17. Bosque de coníferas. En *Vegetación de México* (págs. 295-327). México: CONABIO.
- Sáenz, C. (2011). Guía para mover altitudinalmente semillas y plantas de *Pinus oocarpa*, *P. devoniana* (= *P. michoacana*), *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. hartwegii* para restauración ecológica, conservación, plantaciones comerciales, y adaptación al cambio climático. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- Sáenz, C. (2014). *Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático*. México: CONAFOR.
- Sáenz, C. (2015). Efectos potenciales del cambio climático en los recursos forestales. La sabanización de las regiones continentales de México. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 91-110.
- Sáenz, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P. y Linding, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Elsevier*, 98-106.
- SEMARNAT. (2009). *Cambio climático. Ciencia evidencia y acciones*. México.
- Suárez, V. y Gicli, M. (2014). Apuntes sobre la zonificación agroecológica de los cultivos. Particularidades en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 36-44.

- Velasco, M. d., Morales, T. y Estrella, N. G. (2015). Aplicación del enfoque de minería de datos en la variabilidad del clima en el municipio de ciudad Serdán, Puebla, México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*.
- Villers, L. y Trejo, I. (2000). El cambio climático en México. En C. Gay, *El cambio climático y la vegetación en México. Una visión hacia el siglo XXI* (págs. 239-254). México: Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de México.
- Villers, L., Peña del Valle, A. E. y Rojas, F. (2009). Políticas Forestales en la Malinche. La captura del carbono como alternativa de desarrollo local. En F. Castro, & T. Tucker, *Matlalcuéyetl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo* (págs. 341-366). México: El Colegio de Tlaxcala.
- Zhang, X. y Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0). User manual. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada. Canada*. Recuperado de: (<http://www.r-project.org>, 2017) [Consultado el 19 de enero del 2016].

Páginas consultadas

- (s.f.). Uso del suelo y Vegetación Serie V. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>. [Consultado: el 23 de febrero del 2017].
- (s.f.). Web del Moscow Forestry Sciences Laboratory USDA. Recuperado de: <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/>. [Consultado el 18 de enero del 2017].
- (s.f.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado de: <https://www.species.conabio.gob.mx/>, 2016. [Consultado el: 27 de enero del 2016].

11. ANEXO I

Definición de los Índices climáticos

1. FD0. Días con helada (Frost Days).

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i , en el periodo j . Número de días cuando:

$$T_{nij} < 0^{\circ}\text{C}$$

2. SU25. Días de verano (Summer Days).

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i , en el periodo j . Número de días cuando:

$$T_{xij} > 25^{\circ}\text{C}$$

3. ID0. Días con hielo (Icing Days).

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i , en el periodo j . Número de días cuando:

$$T_{xij} < 0^{\circ}\text{C}$$

4. TR20. Noches tropicales (Tropical nights).

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i , en el periodo j . Número de días cuando:

$$T_{nij} > 20^{\circ}\text{C}$$

5. GSL. Estación de crecimiento (Growing Season Length).

Sea T_{ij} la temperatura media diaria en el día i , en el periodo j . Número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^{\circ}\text{C}$$

Y la primera ocurrencia después del 1º Julio (1º Enero en el Hemisferio Sur) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^{\circ}\text{C}$$

6. TXx. Temperatura máxima extrema.

Sea T_{xkj} la temperatura máxima diaria en el mes k , en el periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXxkj = \max (T_{xkj})$$

7. TNx. Temperatura mínima más alta.

Sea T_{nkj} la temperatura mínima diaria en el mes k , en el periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNxkj = \max (T_{nkj})$$

8. TXn. Temperatura máxima más baja.

Sea T_{xkj} la temperatura máxima diaria en el mes k , en el periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXNkj = \min (T_{xkj})$$

9. TNn. Temperatura mínima extrema.

Sea T_{nkj} la temperatura mínima diaria en el mes k , en el periodo j . La mínima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNnkj = \min (T_{nkj})$$

10. Tn10p. Frecuencia de noches frías.

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{nin10} el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje de tiempo, donde:

$$T_{nij} < T_{nin10}$$

11. Tx10p. Frecuencia de días frescos.

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{xen10} el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje de tiempo, donde:

$$T_{xij} < T_{xen10}$$

12. Tn90p. Frecuencia de noches cálidas.

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{nen90} el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje de tiempo es determinado, donde:

$$T_{nij} > T_{nen90}$$

13. Tx90p. Frecuencia de días calurosos.

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{xen90} el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje de tiempo es determinado, donde:

$$T_{xij} > T_{xen90}$$

14. WSDI. Duración de los períodos cálidos (Warm Spells Duration Index).

Sea T_{xij} la temperatura máxima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{xen90} el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$T_{xij} > T_{xen90}$$

15. CSDI. Duración de los períodos fríos (Cold Spells Duration Index).

Sea T_{nij} la temperatura mínima diaria en el día i , en el periodo j y sea T_{nin10} el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por período es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$T_{nij} > T_{nin10}$$

16. DTR. Rango diario de temperatura (Diurnal Temperature Range).

Sea T_{xij} y T_{nij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (T_{xij} - T_{nij})}{I}$$

17. RX1day. Precipitación máxima en un día.

Sea RR_{ij} el total diario de precipitación en el día i en el periodo j . Entonces los valores máximos de 1 día para el periodo j son:

$$R_{x1dayj} = \max (RR_{ij})$$

18. R_{x5day} . Precipitación máxima en cinco días.

Sea RR_{kj} la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en k , periodo j . Entonces los valores máximos de 5 días para el periodo j son:

$$R_{x5dayj} = \max (RR_{kj})$$

19. SDII. Índice simple de intensidad diaria (Simple Daily Intensity Index).

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en días húmedos, w ($RR=1\text{mm}$) en el periodo j . Si w representa el número de días húmedos en j , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^w RR_{wj}}{W}$$

20. R_{10} . Días con lluvia mayor a 10mm.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} = 10\text{mm}$$

21. R_{20} . Días con lluvia mayor a 20mm.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} = 20\text{mm}$$

22. R_{nn} . Días con lluvia mayor a nn mm.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} = nn\text{mm}$$

23. CDD. Días secos consecutivos (Consecutive Dry Days).

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1\text{mm}$$

24. CWD. Días húmedos consecutivos (Consecutive Wet Days).

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} = 1 \text{ mm}$$

25. R95pTOT. Días muy húmedos.

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo w ($RR=1.0\text{mm}$) en el periodo j y sea RR_{wn95} el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si w representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn95}$$

26. R99p. Días extremadamente húmedos.

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo w ($RR=1.0\text{mm}$) en el periodo j y sea RR_{wn99} el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si w representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ where } RR_{wj} > RR_{wn99}$$

27. PRCPTOT. Precipitación total.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$