

ESTUDIO DE INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL DESARROLLO DE LA AVISPA AGALLADORA DEL ENCINO (*Andricus quercuslaurinus*).

Ángeles Soriano Luna, Jovany Martínez Márquez y Víctor David Cibrián Llanderal

El término cambio climático hace referencia a un cambio de 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 períodos comparables (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). Estos cambios incluyen el aumento de temperaturas y de los niveles de CO₂ en la atmósfera e impactan notablemente en los bosques del mundo y en el sector forestal. Se asume que el cambio climático impactará en la susceptibilidad de los bosques ante los disturbios y afectará la frecuencia, intensidad, duración y ritmos de tales disturbios. También influirá en la dinámica de las plagas forestales autóctonas y patógenas, facilitando al mismo tiempo el establecimiento y la difusión de las especies exóticas.

Por esta razón, hoy en día es de importancia fundamental comprender mejor las relaciones complejas entre el cambio climático, los bosques y las plagas forestales, para garantizar que los tomadores de decisiones y poseedores, y encargados del manejo, sanidad y protección forestal se organicen ante las variaciones en la ocurrencia e impacto de las enfermedades por plagas nativas y exóticas (Moore & Allard, 2008). La temperatura es un factor clave que regula muchos procesos biogeoquímicos terrestres. Las temperaturas más cálidas producen mayores pérdidas de agua por evaporación y evapotranspiración y pueden reducir también la capacidad de las plantas de hacer un uso más eficiente del agua. Estas condiciones pueden disminuir el crecimiento y afectar la sanidad de los árboles. Las especies forestales son especialmente vulnerables al incremento de la temperatura porque son afectadas por las plagas debido a la deficiencia de bajas temperatura para eliminarlas (Gómez-Mendoza & Galicia, 2010)

Los factores de estrés causados por la humedad y la sequía pueden impactar también en la sanidad forestal, aumentando la susceptibilidad a disturbios como plagas, enfermedades e incendios forestales. La influencia del clima sobre los insectos puede ser directa (como factor de mortalidad) o indirecta (influyendo en el índice de crecimiento y desarrollo). Se prevén variaciones en los modelos de disturbio por plagas forestales (insectos, patógenos y otras plagas) como resultado del aumento de las temperaturas, cambios en las precipitaciones, aumento de la frecuencia de sequías y mayores concentraciones de dióxido de carbono. Diversos estudios han observado que los insectos y patógenos responden al calentamiento en todas las formas posibles, desde cambios en su fenología y distribución hasta influencias en las dinámicas y composiciones, así como cambios evolutivos de sus poblaciones en los ecosistemas (Menéndez, 2007). El cambio climático puede afectar las plagas forestales y el daño que éstas causan por medio de: impactos directos en su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; alteración de la fisiología y defensas del árbol huésped; impacto en las relaciones entre plagas, su medio ambiente y otras especies como por ejemplo enemigos naturales, competidores y mutualistas.

Objetivos:

Analizar la temperatura y la precipitación histórica (2000-2018) en la región afectada por la plaga

Generar índices de sequía y de humedad de suelo en la región afectada por la plaga.

Realizar modelos de distribución potencial de la plaga-hospedero usando variables climáticas generadas a escala regional.

Correlacionar las variables de temperatura y precipitación con el desarrollo de la plaga en el encino del periodo de año 2000 al 2018 (en función de la disponibilidad de datos de campo).

Productos:

Mapas base digitales de la temperatura, humedad relativa y precipitación del área bajo estudio en el año 2000.

Mapas digitales de cambios de la temperatura, humedad relativa y precipitación en la región bajo estudio

Mapas de índice de sequía y de humedad del suelo en la región bajo estudio.

Mapas de distribución de la plaga con variables climáticas generadas a nivel local.

Documentos de análisis estadísticos de las correlaciones de temperatura, precipitación e índices con el desarrollo de la plaga.

Geodatabase de los mapas generados.

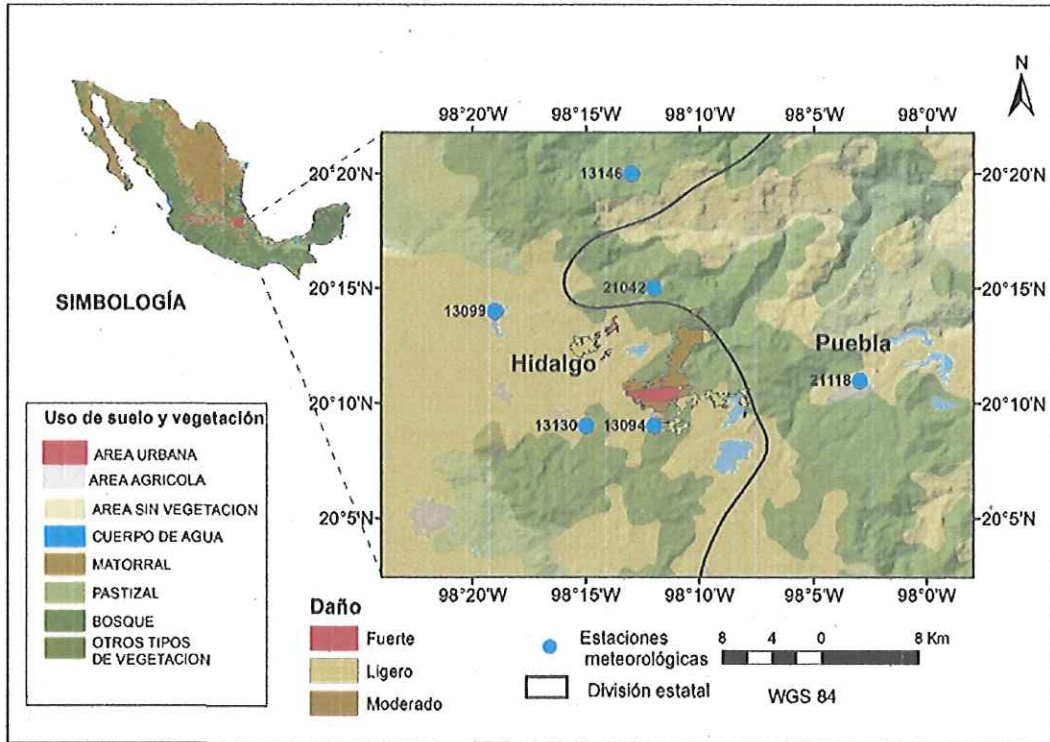


Figura 1. Ubicación y estaciones meteorológicas con información disponible de mayor a 30 años y menor a 15 años.

Se analizaron las bases de datos climáticas nacionales disponibles. Las bases de datos de Climating Computing Program (CLICOM) (<http://clicom-mex.cicese.mx/>) (CICESE, 2018) y el Servicio Meteorológico Nacional.

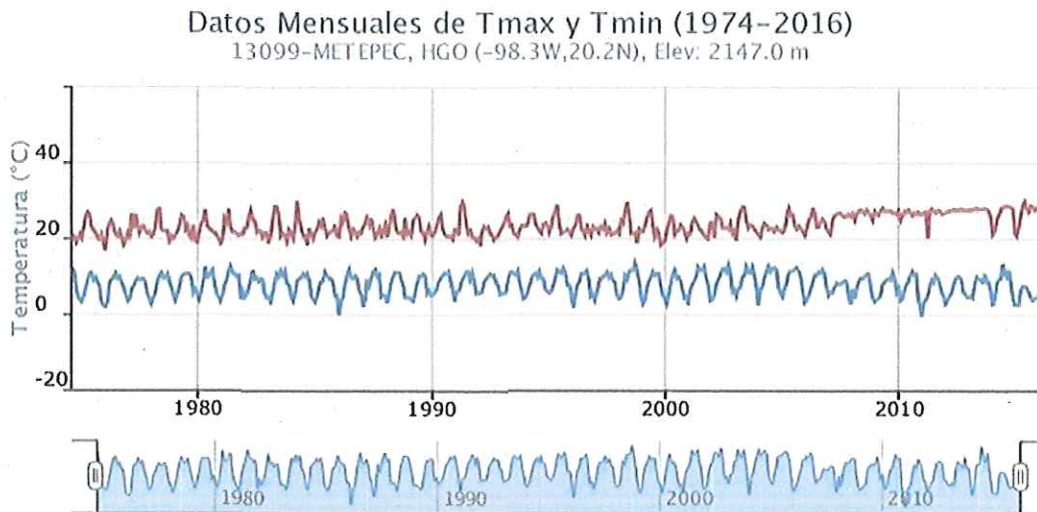


Figura 2. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en estación la meteorológica Metepec (13099). Fuente (CLICOM, 2018).

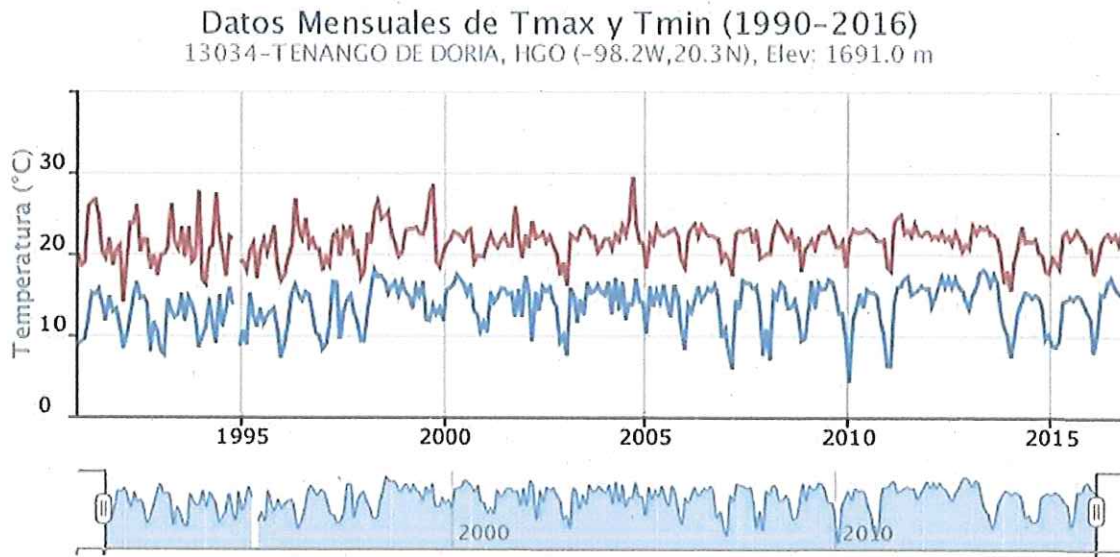


Figura 3. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Tenango (13034). Fuente (CLICOM, 2018).

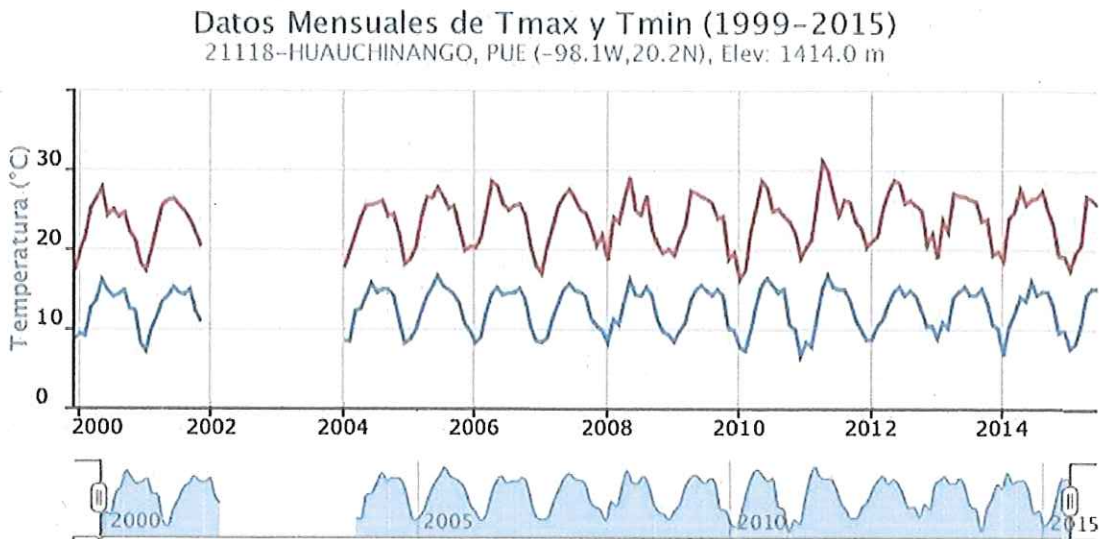


Figura 4. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Huahuchinango (21118). Fuente (CLICOM, 2018).

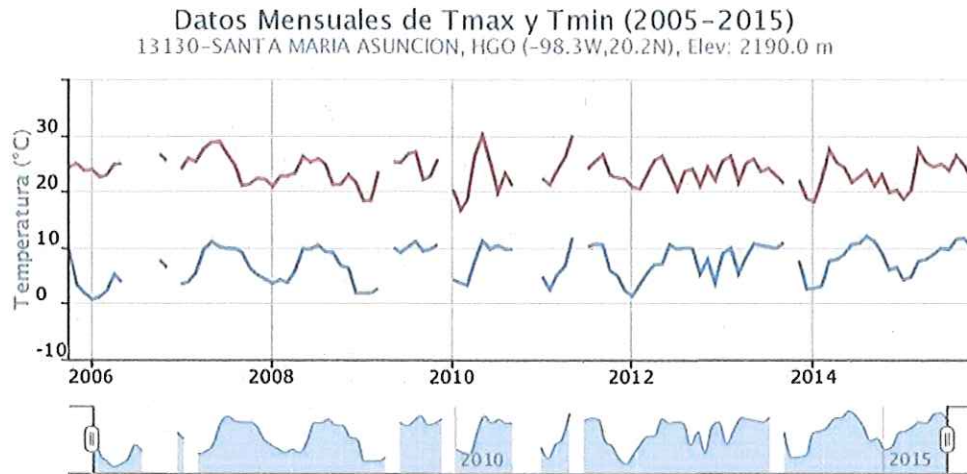


Figura 5. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Santa María Asunción (131130). Fuente (CLICOM, 2018).

De forma general, parece existir una tendencia de aumento en la temperatura máxima y mínima en las estaciones con datos disponibles.

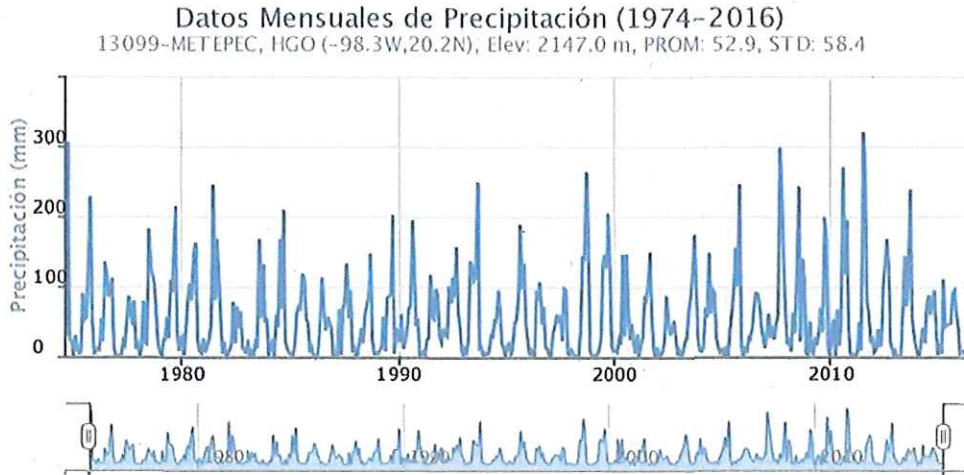


Figura 6. Serie histórica de precipitación mensual en la estación de Metepec (13099). Fuente (CLICOM, 2018).

Datos Mensuales de Precipitación (1990-2016)

13034-TENANGO DE DORIA, HGO (-98.2W,20.3N), Elev: 1691.0 m, PROM: 141.6, STD: 143.6

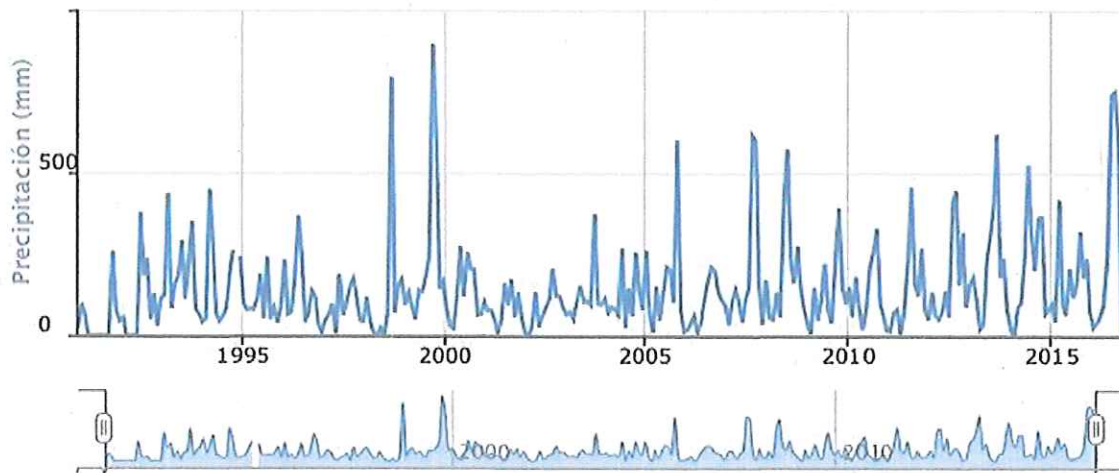


Figura 7. Serie histórica de precipitación mensual en la estación de Tenango (13034). Fuente (CLICOM, 2018).

En la precipitación se observa gran variabilidad, mientras que en la estación de Metepec se observa una tendencia de disminución de la precipitación en los últimos años, no se observa la misma tendencia en la estación de Tenango.

GENERACIÓN DE MAPAS

Se utilizó la información climática histórica disponible y el modelo de elevación digital (MED) con resolución de 15 m, disponible del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2013) para generar mapas de las variables climáticas de temperatura media, precipitación y humedad relativa anuales. La inferencia espacial se realizó mediante un análisis de regresión lineal simple y se empleó el software ClimateNA versión 5.1 para realizar el escalamiento. Los análisis estadísticos se realizaron en el paquete estadístico R versión 3.3 (R Development Core Team, 2016).

El análisis temporal indica que la temperatura media se ha incrementado en 0.20 grados de 2000 a 2010 (Figuras 8 y 9) con aumento de áreas más cálidas. En contraste la precipitación y humedad relativa promedio anuales han disminuido en el mismo periodo, aproximadamente en 15 mm y 1% (Figuras 10-13). Es notable un incremento en áreas con menor humedad de acuerdo con los gráficos

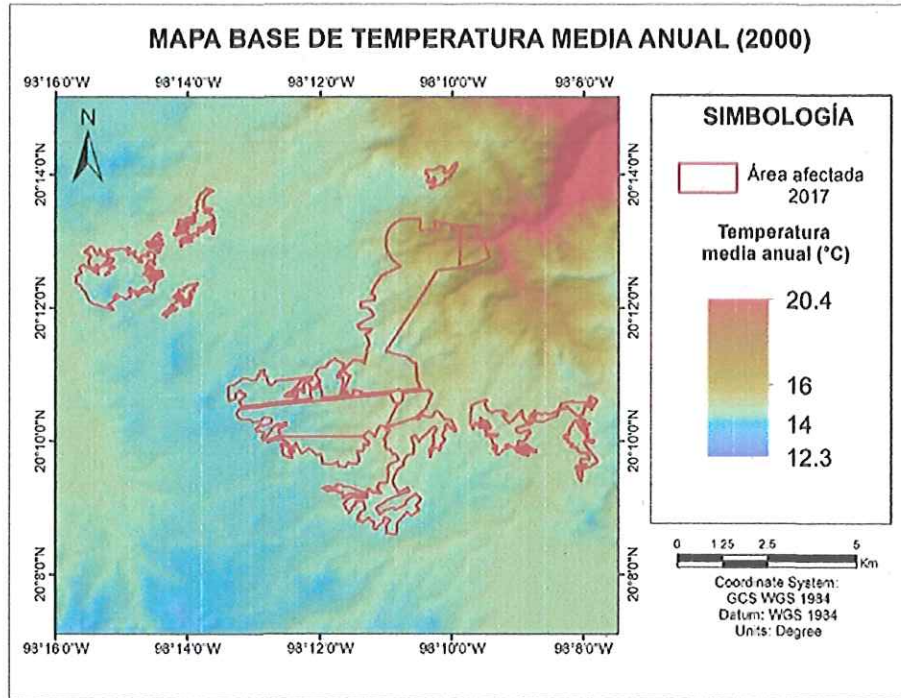


Figura 8. Mapa de temperatura media anual en el año 2000

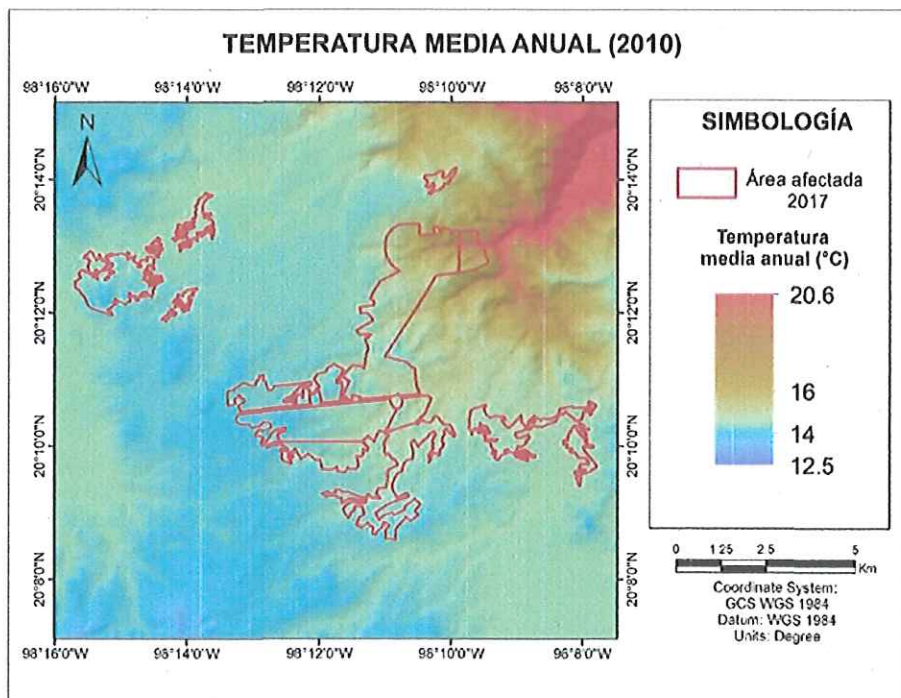


Figura 9. Mapa de temperatura media anual en el año 2010

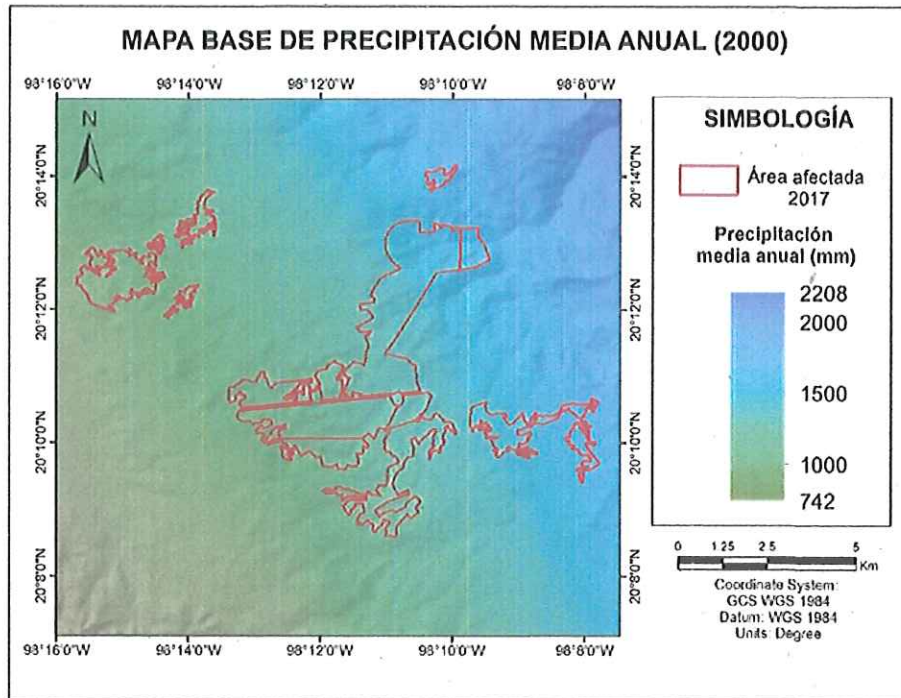


Figura 10. Mapa de precipitación anual en el año 2000

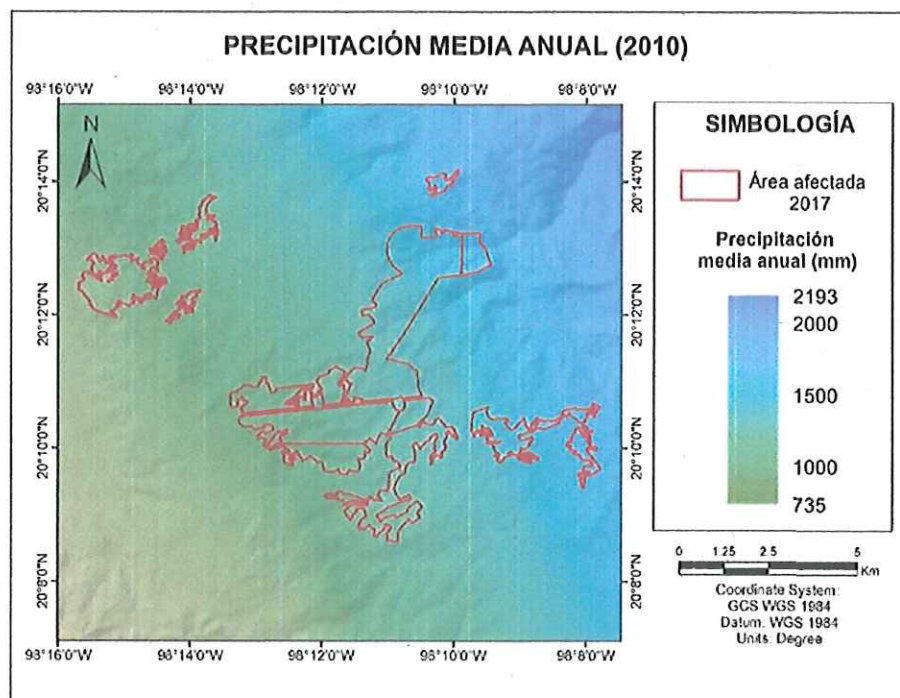


Figura 11. Mapa de precipitación anual en el año 2010

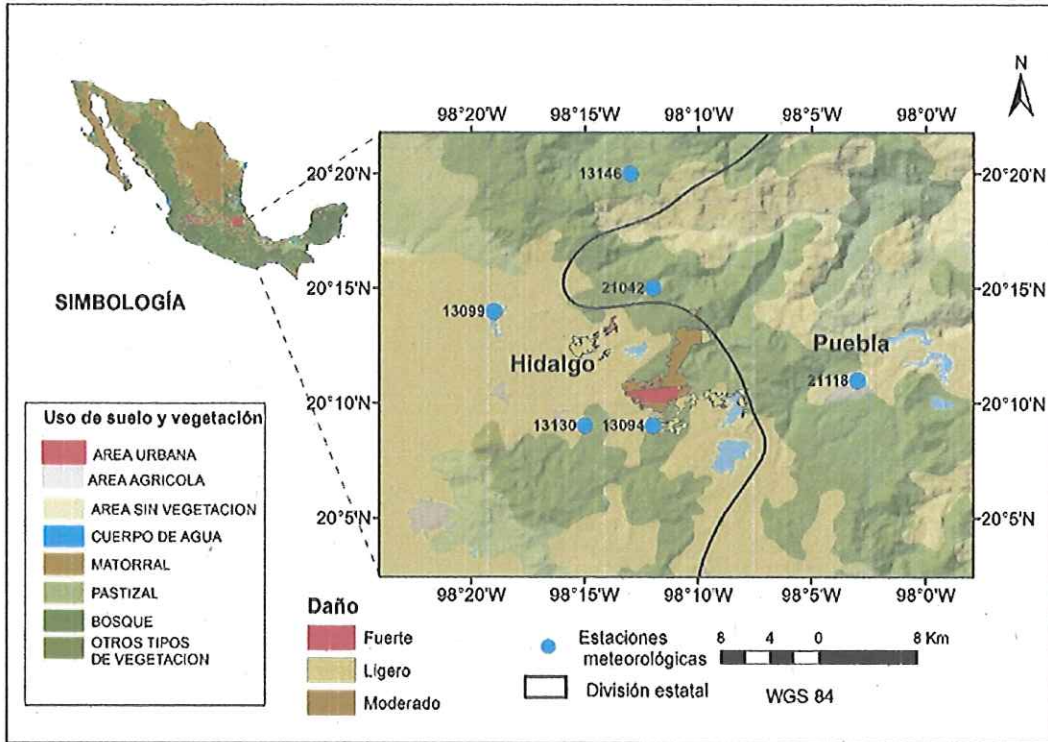


Figura 1. Ubicación y estaciones meteorológicas con información disponible de mayor a 30 años y menor a 15 años.

Se analizaron las bases de datos climáticas nacionales disponibles. Las bases de datos de Climating Computing Program (CLICOM) (<http://clicom-mex.cicese.mx/>) (CICESE, 2018) y el Servicio Meteorológico Nacional.

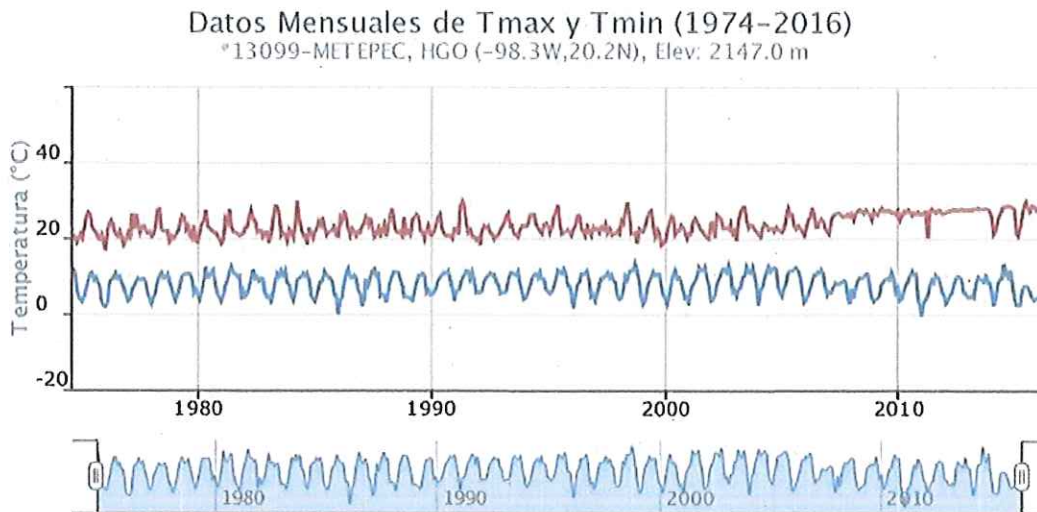


Figura 2. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en estación la meteorológica Metepec (13099). Fuente (CLICOM, 2018).

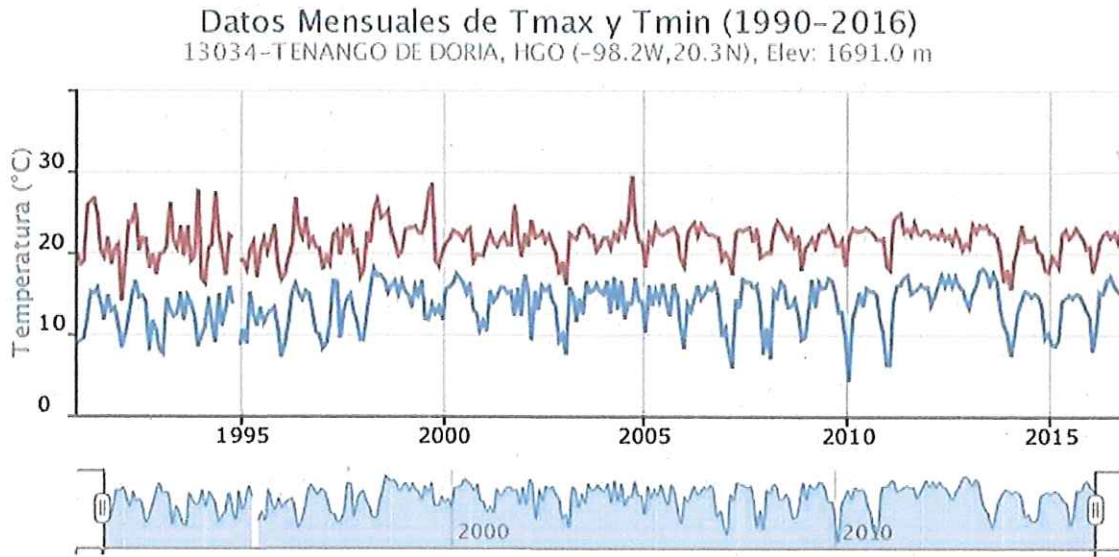


Figura 3. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Tenango (13034). Fuente (CLICOM, 2018).

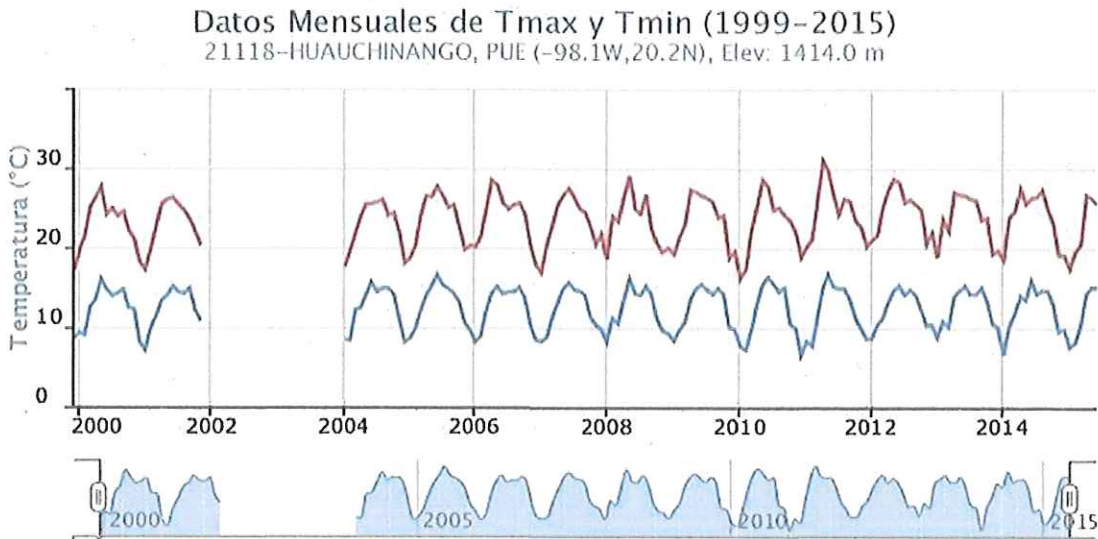


Figura 4. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Huahuchinango (21118). Fuente (CLICOM, 2018).

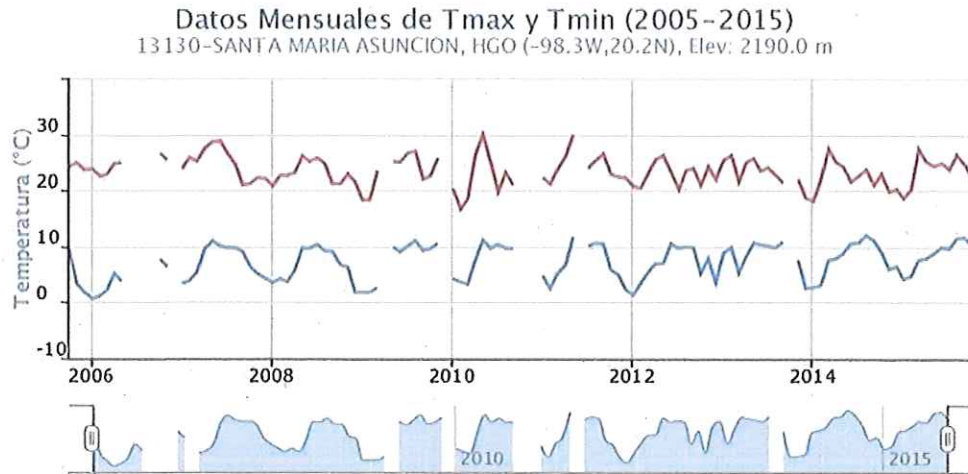


Figura 5. Series de tiempo de temperatura máxima y mínima mensual en la estación meteorológica Santa María Asunción (131130). Fuente (CLICOM, 2018).

De forma general, parece existir una tendencia de aumento en la temperatura máxima y mínima en las estaciones con datos disponibles.

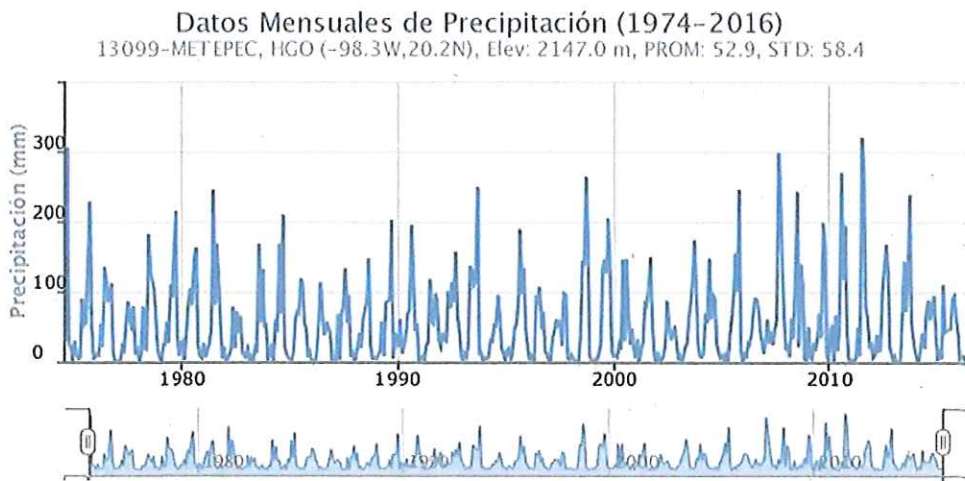


Figura 6. Serie histórica de precipitación mensual en la estación de Metepec (13099). Fuente (CLICOM, 2018).

Datos Mensuales de Precipitación (1990-2016)
13034-TENANGO DE DORIA, HGO (-98.2W,20.3N), Elev: 1691.0 m, PROM: 141.6, STD: 143.6

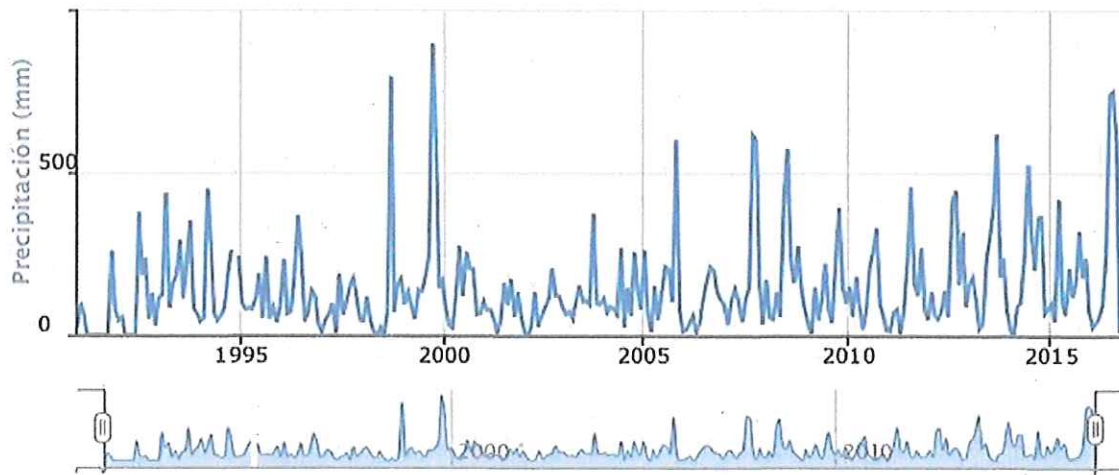


Figura 7. Serie histórica de precipitación mensual en la estación de Tenango (13034). Fuente (CLICOM, 2018).

En la precipitación se observa gran variabilidad, mientras que en la estación de Metepec se observa una tendencia de disminución de la precipitación en los últimos años, no se observa la misma tendencia en la estación de Tenango.

GENERACIÓN DE MAPAS

Se utilizó la información climática histórica disponible y el modelo de elevación digital (MED) con resolución de 15 m, disponible del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2013) para generar mapas de las variables climáticas de temperatura media, precipitación y humedad relativa anuales. La inferencia espacial se realizó mediante un análisis de regresión lineal simple y se empleó el software ClimateNA versión 5.1 para realizar el escalamiento. Los análisis estadísticos se realizaron en el paquete estadístico R versión 3.3 (R Development Core Team, 2016).

El análisis temporal indica que la temperatura media se ha incrementado en 0.20 grados de 2000 a 2010 (Figuras 8 y 9) con aumento de áreas más cálidas. En contraste la precipitación y humedad relativa promedio anuales han disminuido en el mismo periodo, aproximadamente en 15 mm y 1% (Figuras 10-13). Es notable un incremento en áreas con menor humedad de acuerdo con los gráficos

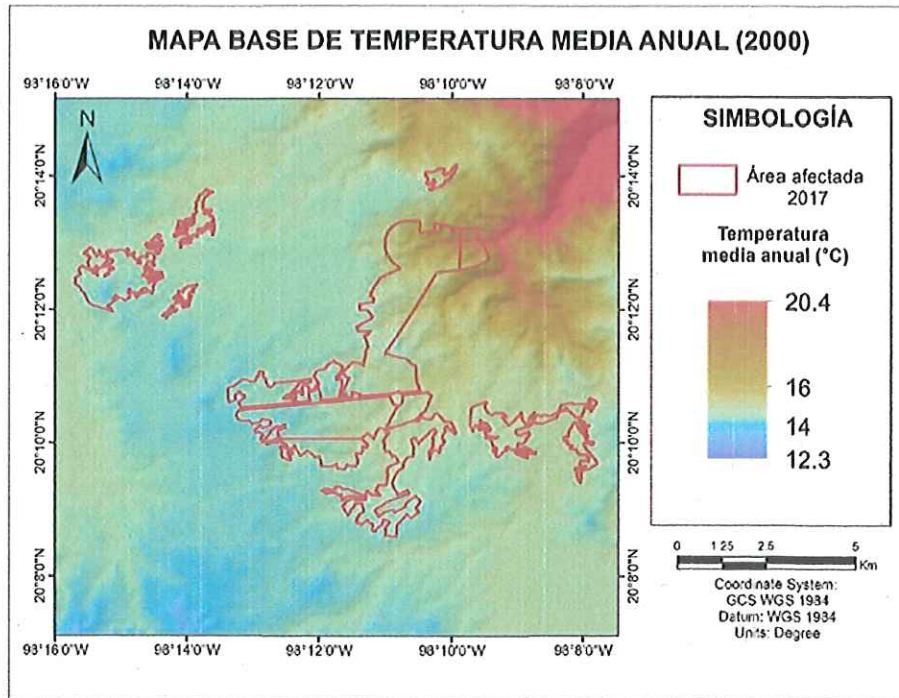


Figura 8. Mapa de temperatura media anual en el año 2000

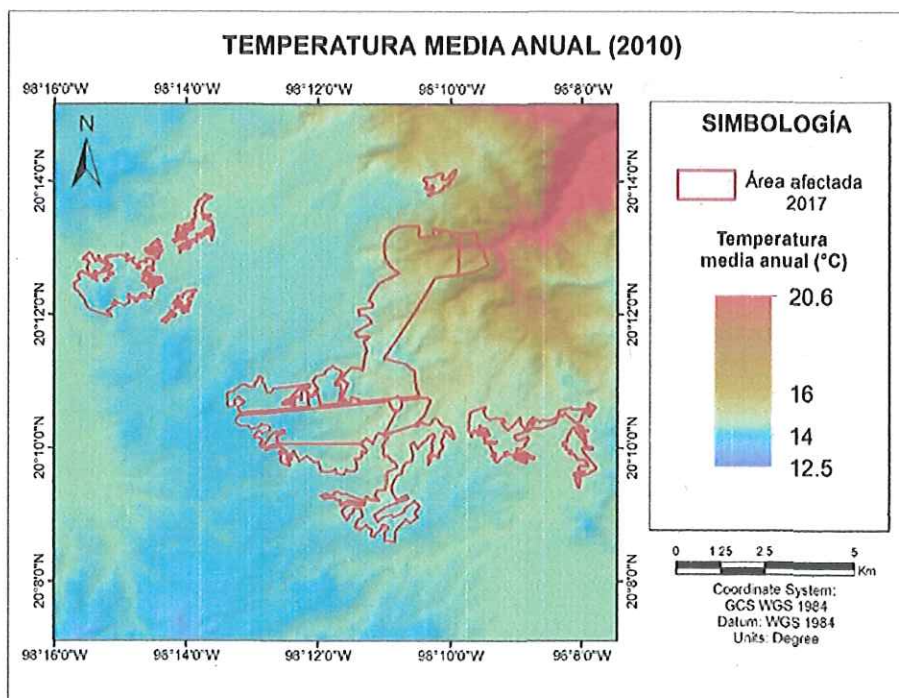


Figura 9. Mapa de temperatura media anual en el año 2010

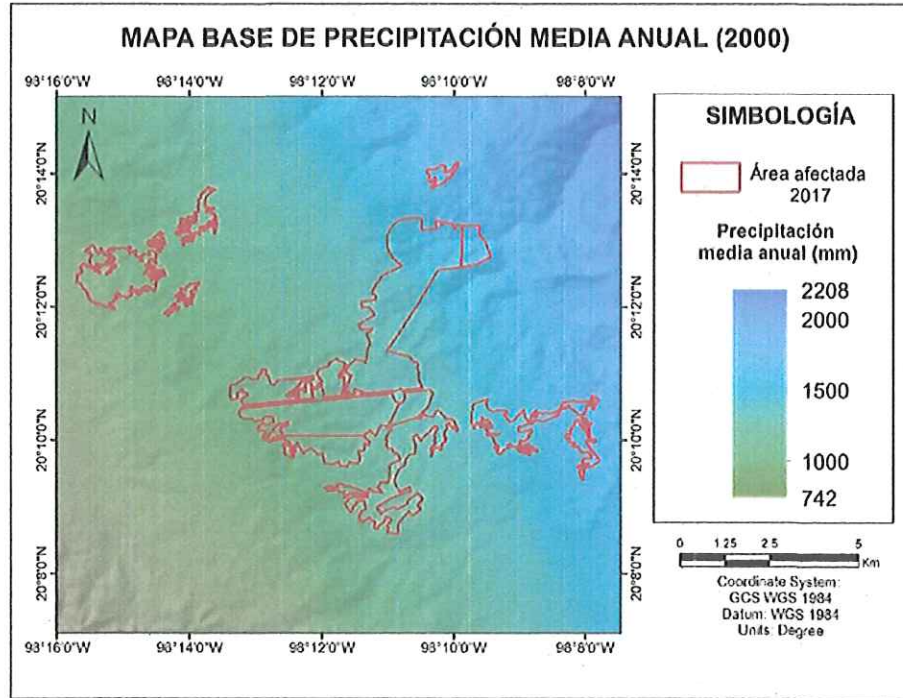


Figura 10. Mapa de precipitación anual en el año 2000

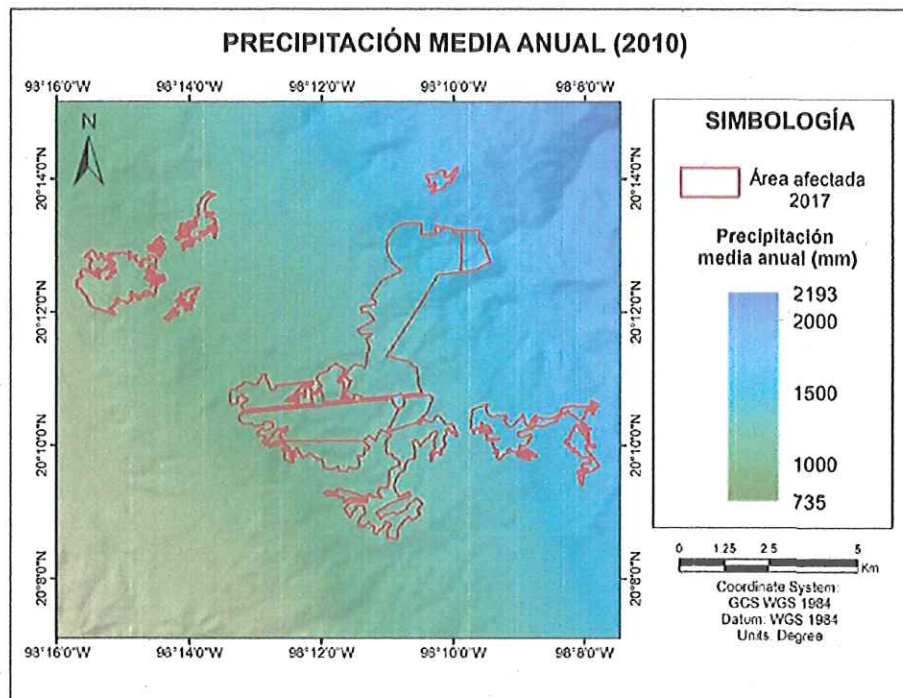


Figura 11. Mapa de precipitación anual en el año 2010

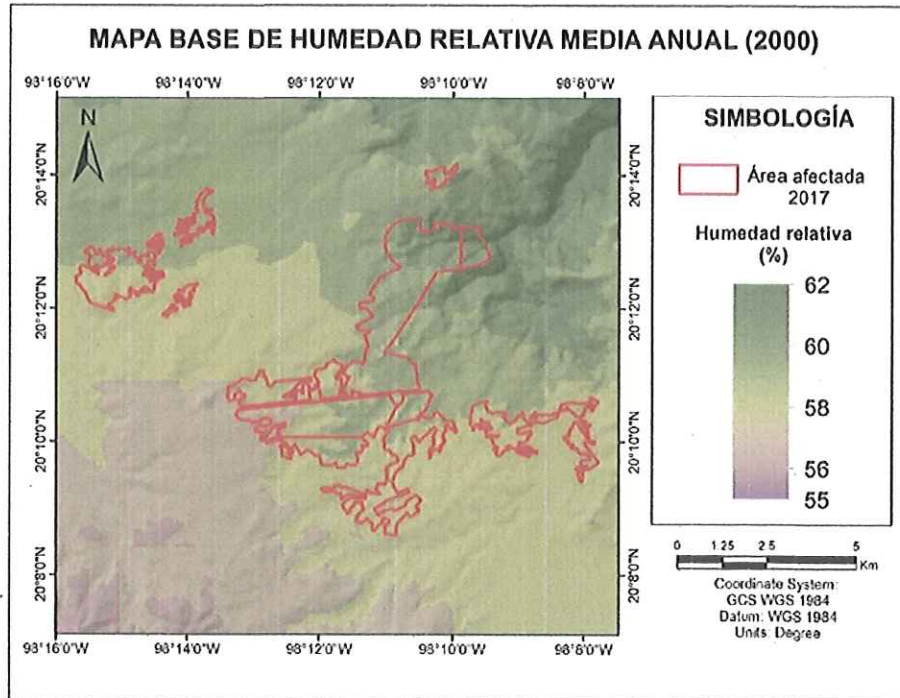


Figura 12. Mapa de humedad relativa anual en el año 2000

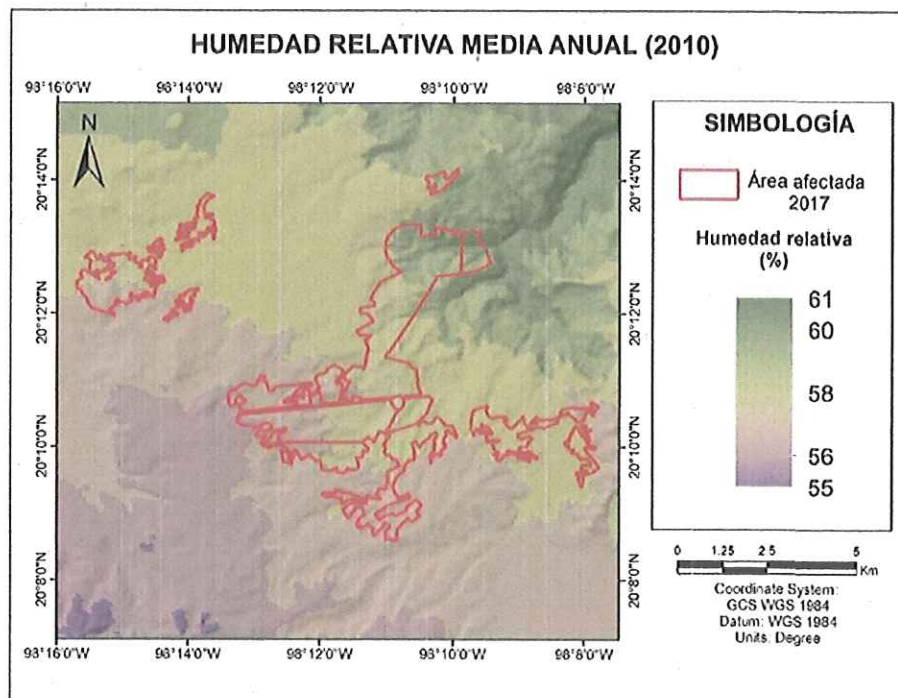


Figura 13. Mapa de humedad relativa anual en el año 2010

Índice de sequía y de humedad del suelo en la región bajo estudio.

La sequía es un fenómeno climático recurrente que se caracteriza por una reducción en la precipitación pluvial con respecto a la considerada como normal para una zona determinada (Gaucin, 2014). México, históricamente ha sido afectado por las sequías recurrentes, cuya frecuencia y severidad se ha incrementado en los últimos años muy probablemente como consecuencia del cambio climático global. En las últimas décadas, la observación de la sequías en territorio nacional ha cobrado relevancia a raíz del descubrimiento de la fuerte influencia del fenómeno climático *El Niño Southern Oscillation* (ENSO); aumento de la temperatura; cambios en la intensidad, distribución espacial y temporal de la precipitación, así como al incremento de fenómenos hidrometeorológicos más extremos (Cervantes-Martínez *et al*, 2019). Sin embargo, no presenta epicentro ni trayectorias definidas y tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y del espacio. Por un lado, en las últimas décadas se han registrado en México varios años deficitarios de lluvias, por lo que las frecuentes sequías han asolado grandes extensiones agrícolas y comunidades rurales, además de propiciar severos desajustes en la economía regional y nacional, tal como ocurrió durante la sequía de 2011-2012, la más severa de los últimos 70 años, según apreciaciones de diversos actores (Gaucin, 2014).

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés) también conocido como el Índice Normalizado de Precipitación es uno de los índices que actualmente se utilizan para vigilar la sequía. Este índice creado por McKee en 1993 destaca por la sencillez, facilidad de cálculo y su significado desde el punto de vista estadístico, se utiliza únicamente la precipitación para su cálculo y es efectivo para analizar los períodos y ciclos húmedos y secos. Los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana (Svoboda *et al.*, 2012). El SPI puede calcularse para distintas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48 meses) lo cual permite evaluar la severidad de la sequía en el corto y largo período. Se ha estimado el SPI de 12 meses bajo la proyección del escenario de emisiones A2 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático por Prieto

González *et al.* (2011). El análisis indica un incremento en la ocurrencia y severidad de eventos de sequía en México.

El índice de sequía se obtuvo mediante el SPI calculado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a partir de un conjunto de estaciones de su Base de Datos Climatológica, disponible en <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitoreo-de-sequia/spi>. La ubicación central de la región fue 20.172° de latitud y -98.193° de longitud.

Los SPI mensuales calculados indican que se presentaron sequías a corto (3 meses) y a largo plazo (12 meses) en la mayoría de los años analizados. En el año 2000 no se presentaron sequías a corto ni largo plazo. Se presentaron con mayores sequías posterior al año 2000. A partir del 2010 se ha incrementado la frecuencia de sequías tanto a corto y largo plazo (Figura 14 y 15).

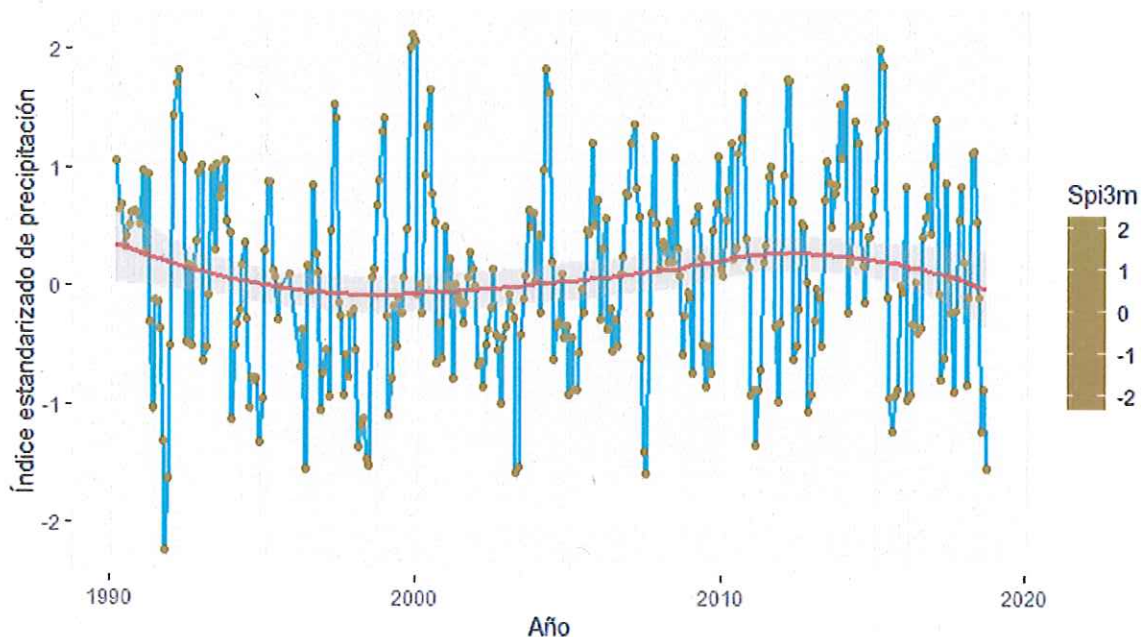


Figura 14. Índice estandarizado de precipitación de 3 meses.

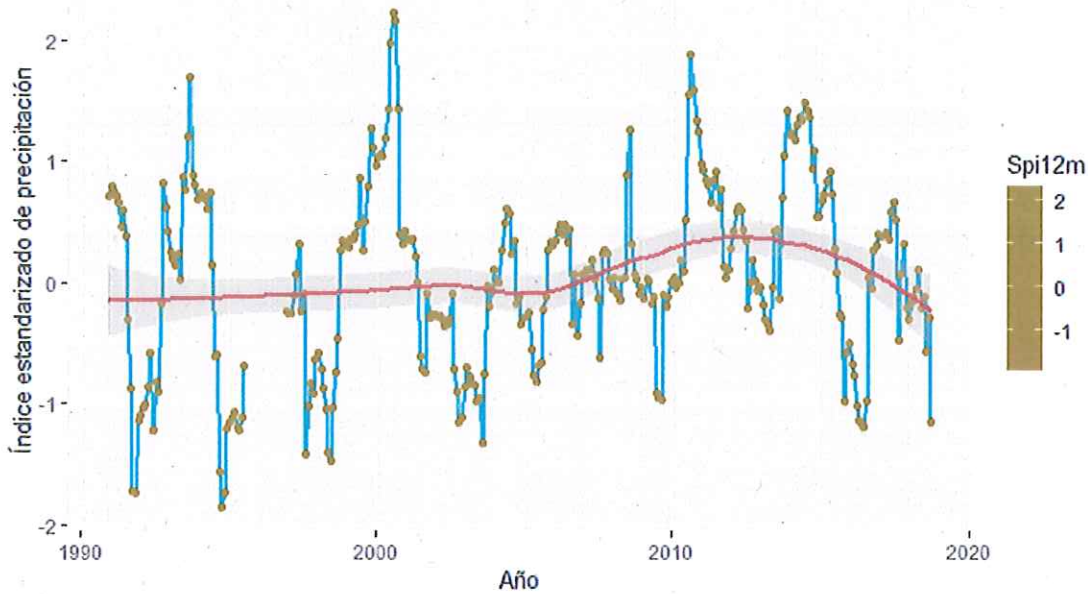


Figura 15. Índice estandarizado de precipitación de 12 meses (Spi12m).

Correlaciones de temperatura, precipitación e índices con el desarrollo de la plaga.

El clima, particularmente las temperaturas y las precipitaciones, tienen una influencia enorme en el desarrollo, reproducción y supervivencia de plagas de insectos y agentes patógenos y, como resultado, es altamente probable que estos organismos se vean afectados por cualquier cambio en el clima (Moore & Allard, 2008). Se prevén variaciones en los modelos de perturbación, en un entorno de cambios climáticos producidos por las plagas forestales (insectos, agentes patógenos y otras plagas) como resultado del aumento de las temperaturas, cambios en las precipitaciones y acentuación de la frecuencia de las sequías (Sturrock *et al.*, 2011). Estos cambios tendrán un papel fundamental en la transformación de los bosques y el sector forestal del mundo.

Por su naturaleza de organismos de sangre fría, los insectos y agentes patógenos forestales pueden responder rápidamente a sus ambientes climáticos, impactando directamente en su desarrollo, supervivencia, reproducción y expansión. El impacto del cambio climático en la frecuencia e intensidad de los brotes de insectos es

menos evidente, principalmente porque no hay suficientes datos a largo plazo para realizar los análisis correspondientes. Sin embargo, se prevé que el cambio climático puede afectar las plagas forestales y el daño que éstas causan por medio de: impactos directos en su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; alteración de la fisiología y defensas del árbol huésped; impacto en las relaciones entre plagas, su medio ambiente y otras especies, por ejemplo, enemigos, competidores y mutualistas. Hay evidencias de que los brotes de plagas en Canadá oriental parecen haber aumentado en frecuencia y en gravedad en los últimos 200 años (Simard, Morin y Lavoie, 2006).

Para conocer la influencia de variables climáticas sobre la afectación de la avispa agalladora de ramas y hojas (generación sexual) del encino *Quercus affinis* se obtuvieron las variables climáticas de temperatura máxima y mínima mensual, precipitación mensual, promedio históricas de 1990 a 2017 para la región. La temperatura media anual, grados-día menor a 0°C, grados-día mayor a 5°C.

La temperatura máxima y mínima mensuales presentan una tendencia a incrementar en los últimos años. La mayor evidencia del incremento se observó en la temperatura máxima (Figura 16 y 17). La precipitación mensual no parece presentar una tendencia (Figura 18) en los últimos años. Los grados-día bajo 0°C parece presentar una ligera disminución en los últimos años (Figura 19). En contraste los grados-día mayor a 5°C presentan un incremento en la última década (Figura 20).

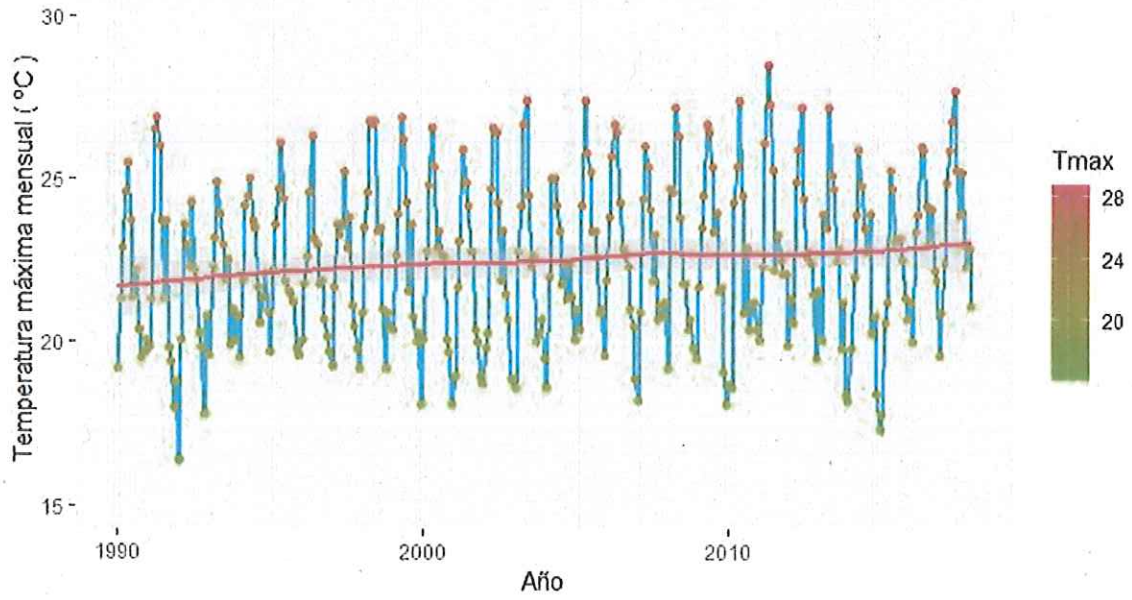


Figura 16. Serie temporal de temperatura máxima mensual.

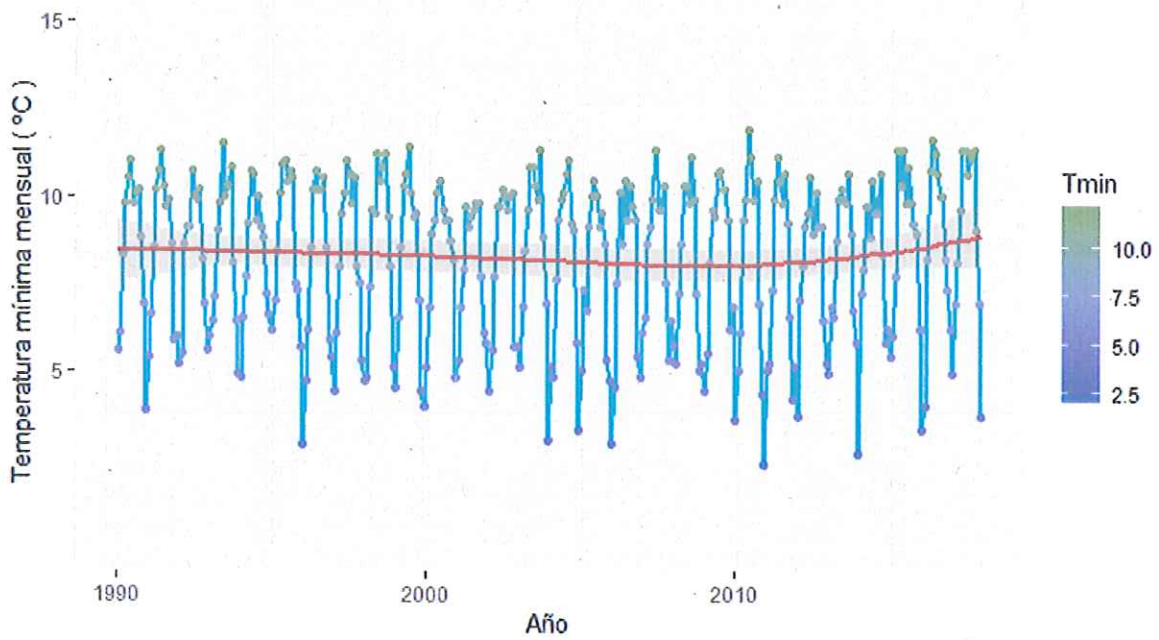


Figura 17. Serie temporal de temperatura mínima mensual.

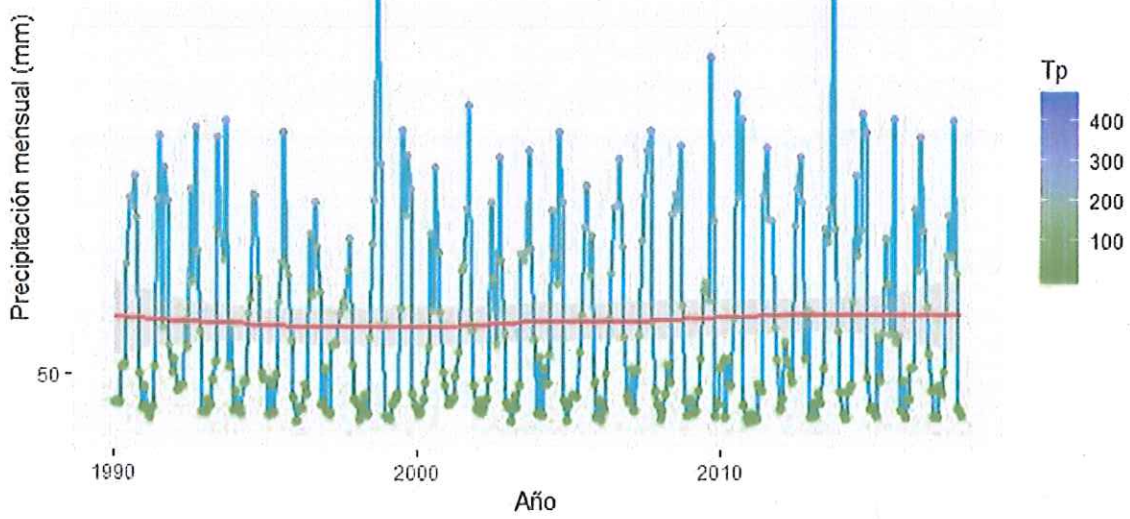


Figura 18. Serie temporal de la precipitación mensual.

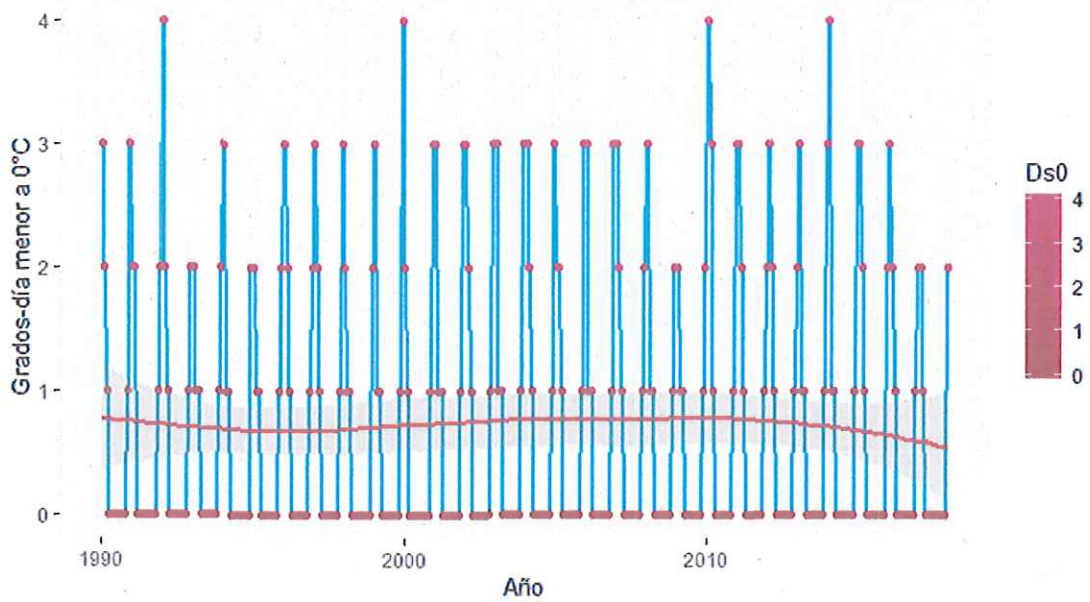


Figura 19. Grados-día menor a 0°C mensual

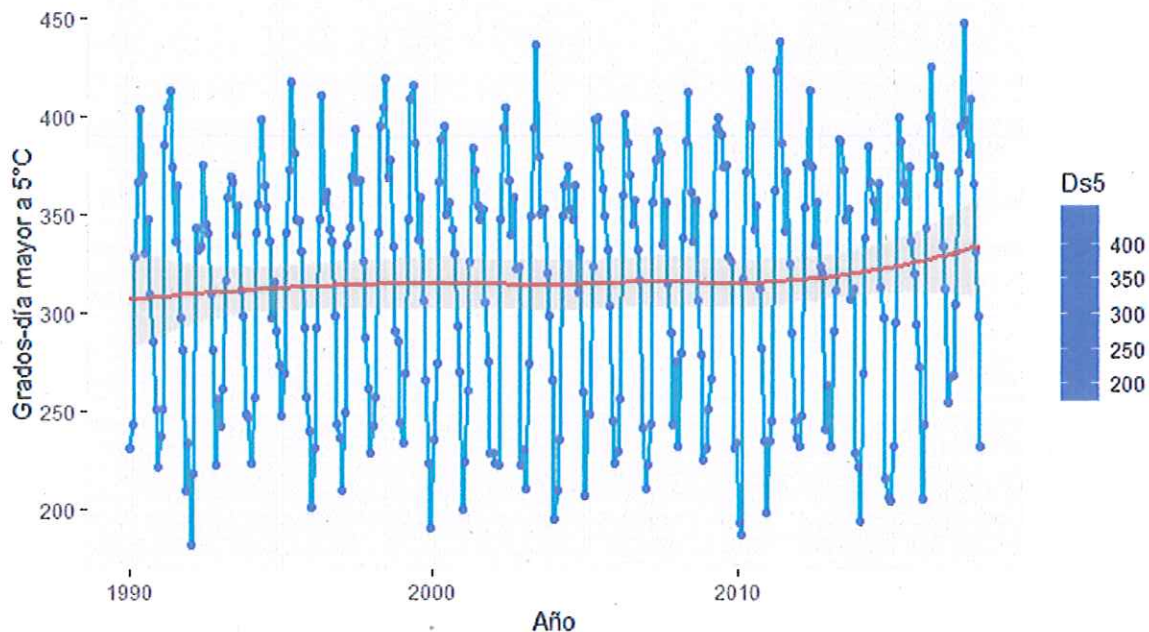


Figura 20. Grados día mayor a 5°C mensual.

Considerando que no existe un monitoreo anual y mensual desde que se presentó la plaga en la zona de estudio. Para el análisis estadístico se asumió un incremento lineal en la superficie afectada a partir del año 2006 cuando se detectó la plaga de avispa. Con este supuesto se realizó el análisis de correlación entre superficie afectada (sup) de los años 2006 a 2017 y las variables climáticas de temperatura promedio anual (MAT), temperatura promedio del mes más caliente (MWMT), precipitación anual (MAP), grados-día menor a 0°C (DD_0), grados-día mayor a 5°C (DD5), humedad relativa (HR).

Se observa una alta correlación positiva entre la superficie afectada y la temperatura promedio anual ($cor=0.49$) y la temperatura promedio del mes más caliente ($cor=0.52$) (Figura 21). De igual forma existe una correlación positiva entre la superficie afectada y los grados-día mayor a 5°C.

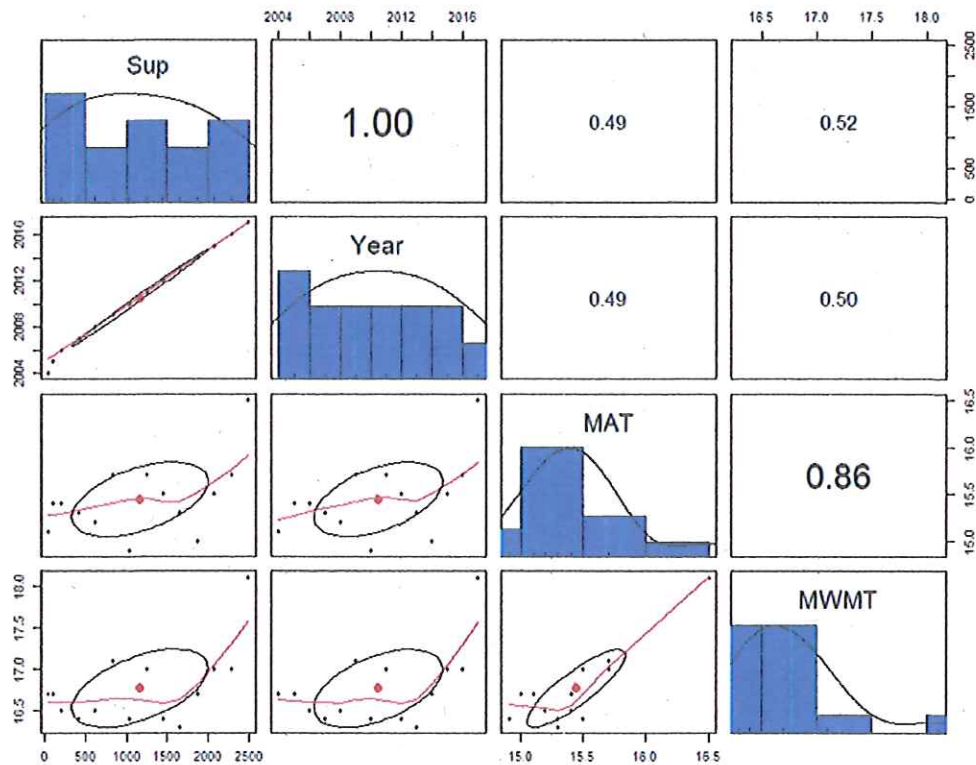


Figura 21. Correlación entre superficie afectada y variables de temperatura. Year=año, MAT=temperatura promedio anual, MWMT=temperatura promedio del mes más caliente.

La precipitación anual y la humedad relativa presentan una correlación baja (0.07 y 0.16) con la superficie afectada (Figura 22). Los grados-día menor a 0°C presenta una corrección baja con un efecto negativo sobre la superficie afectada (-0.20). Esto sugiere que la disminución de días con temperaturas menores a 0°C ha beneficiado al incremento de la superficie afectada por la avispa.

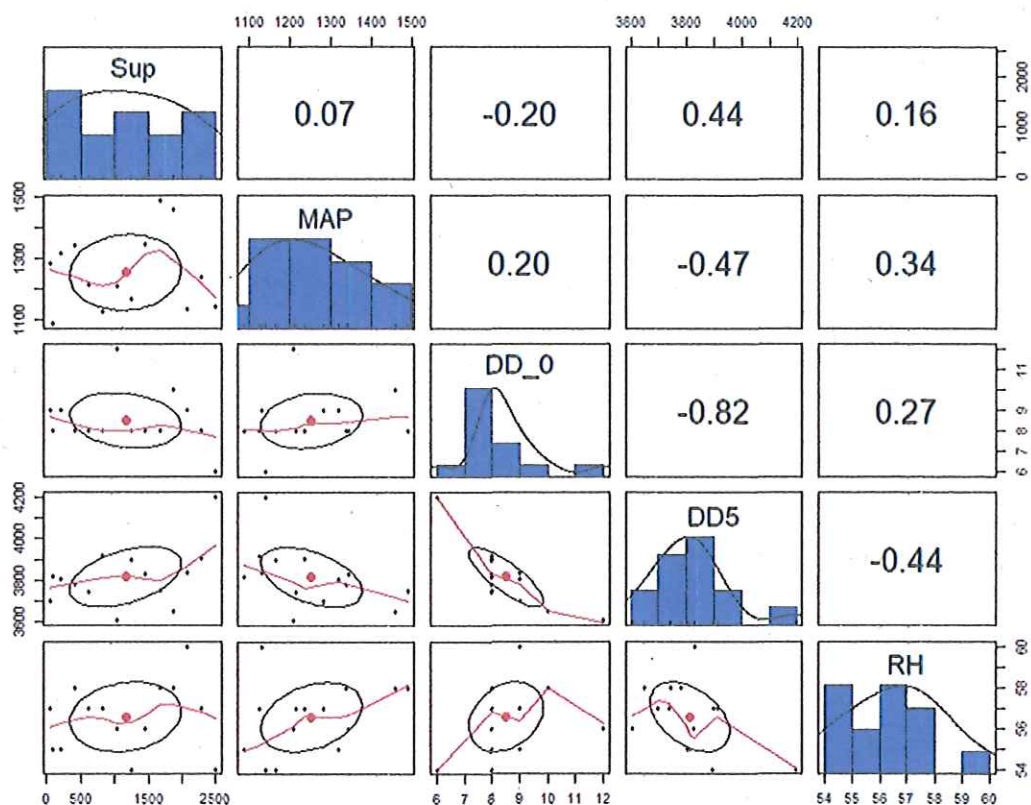


Figura 22. Correlación entre superficie afectada y variables climáticas. MAP=precipitación anual, DD_0=grados-día menor a 0°C, DD5=grados-día mayor a 5°C, HR=humedad relativa.

Los resultados evidencian que el incremento de temperatura tanto mínima como máxima, así como disminución de presencia de temperaturas menores a 0°C en la zona de estudio han incrementado las tendencias de la superficie afectada por la avispa. Esto confirma las previsiones de que se incrementará la presencia de plagas forestales con el calentamiento climático. El cambio climático puede afectar las plagas forestales y el daño que éstas causan por medio de: impactos directos en su desarrollo, supervivencia, reproducción, distribución y expansión; alteración de la fisiología y defensas del árbol huésped; impacto en las relaciones entre plagas, su medio ambiente y otras especies.

En el análisis se incluyó el índice de sequía de verano sugerido por (Wang et al., 2016) calculado mediante la relación.

$$IH = (MWMT) / (MSP / 1000)$$

Donde MWMT es temperatura promedio del mes más caliente y MSP se refiere a la precipitación de mayo a septiembre.

Adicionalmente se utilizaron las variables de grados días de temperatura mayores a 5°C (dd5), y la precipitación total anual promedio (MAP) para estimar el índice anual de sequía (o aridez), de acuerdo a la ecuación sugerida por García & Sierra Villagrana (2018) y Sáenz-Romero (2014) mediante el cociente:

Índice anual de aridez = (raíz cuadrada de DD5 / MAP).

En el análisis no se evidenció una relación entre el índice de sequía de verano y la superficie afectada por la avispa en los años de estudio de la plaga (2006-2017) (Figura 23). Tampoco se encontró relación entre el índice anual de aridez y la presencia de la plaga (Figura 23). A pesar de que no hubo una relación directa entre estos índices y la superficie afectada por la plaga en los años analizados, el índice sí se ha incrementado respecto a los años donde no se había detectado la plaga de avispa. La combinación de mayor temperatura y menor precipitación ha causado que los ecosistemas tengan un clima más árido (Sáenz-Romero, 2014) particularmente los bosques de encino.

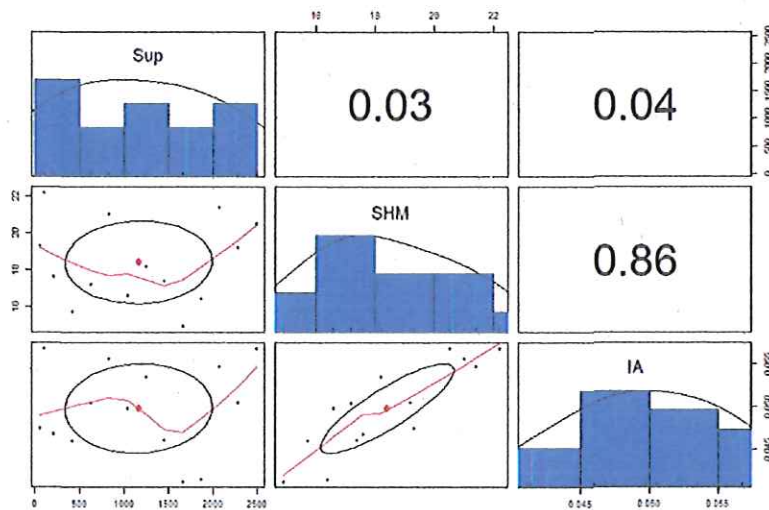


Figura 23. Correlación entre superficie afectada e SHM (índice de sequía de verano) e IA (índice anual de aridez).

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA AVISPA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para determinar la distribución potencial de la avispa agalladora (*Andricus quercuslaurinus* Melika y Pujade-Villar) bajo escenarios de cambio climático, primeramente, se determinó la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático de las especies hospedantes y posteriormente se determinó la distribución potencial de la avispa mediante una zonificación.

Para el análisis de la distribución de la avispa bajo escenarios de cambio climático, se seleccionó un área de la ecorregión: Bosques de coníferas, encino y mixtos de la Sierra Madre Oriental de acuerdo a la estratificación de ecorregiones terrestres (INEGI-CONABIO-INE, 2008). Se gestionaron y analizaron las bases de datos de variables climáticas con escenarios de cambio climático generadas para México mediante interpolación de superficies disponible en <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/> (Sáenz-Romero et al., 2010, Sáenz-Romero, 2014) y mediante superficies suavizadas (Wang et al., 2016, Wang et al., 2018) disponible en <http://cfcg.forestry.ubc.ca/projects/climate-data/climate-bcwna/#ClimateNA>.

Con base en la validación regional de las variables ambientales actuales (60-90% de coincidencia) y para mantener la información de las parcelas de campo y la consistencia en la resolución espacial para la región de estudio (200 m), se eligió la base de superficies suavizadas para realizar el análisis regional. Para el análisis prospectivo, se seleccionó el escenario de cambio climático canadiense CGCM3 por sus siglas en inglés (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis). Se usaron dos trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) caracterizadas por su forzamiento radiativo (FR) total: 4.5 y 8.5 al año 2030. El escenario RCP4.5 es intermedio mientras que el escenario RCP8.5 indica un nivel muy alto de emisiones de GEI.

Distribución potencial de especies hospedantes.

Durante los últimos años hemos registrado que la avispa agalladora *Andricus quercuslaurinus* Melika y Pujade-Villar (Hymenoptera: Cynipidae) ha atacado a la especie de *Quercus laurina* Bonpl (Melika et al., 2009) y principalmente a *Quercus affinis* Scheidw (Cibrián-Tovar et al., 2013). La especie de *Q. affinis* se distribuye entre los 1,200 y 2,600 m sobre el nivel del mar en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz (Valencia, 2004). Para obtener las áreas de distribución geográfica potencial de las especies, se consideraron las características ambientales de *Q. affinis* y *Q. laurina* (Cuadro 1) y se realizó una zonificación multicriterio mediante la metodología ampliamente usada para determinar la distribución potencial (Díaz et al., 2007, Sáenz-Romero et al., 2012, García & Sierra Villagrana, 2018) de las especies hospedantes.

Cuadro 1. Requerimientos de las especies hospedantes de avispa

Aptitud/ Requerimientos	Zonas potenciales	Zonas potenciales
Altitud	1,200-2,600	2,440-3,065
Especie	<i>Quercus affinis</i>	<i>Quercus laurina</i>
Exposición del terreno	N-NE	N
Pendiente del terreno	Menor a 40%	Menor de 50%
Precipitación anual	1,000-1,600	900-2,000
Temperatura media anual	14.5-17	15-18
Suelo	Someros tipo cárstico	

Se utilizó la información espacial de variables climáticas generadas (temperatura media anual máxima, mínima, precipitación total anual y humedad relativa) actuales y las obtenidas bajo escenarios de cambio climático. Las variables adicionales fueron de altitud, exposición (orientación), pendiente y sombreado. Estas últimas se generaron a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM) (INEGI, 2013) disponible en la página oficial del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Se consideró permanencia en las condiciones topográficas al año 2030.

	Ligero	Moderado	Severo
Temperatura media anual máxima (°C)	15.2	16.5	17.1
Temperatura media anual mínima (°C)	14.6	14.9	16.0
Precipitación media anual máxima (mm)	1,672	1,692	1,231
Precipitación media anual mínima (mm)	943	1,040	1,036
Humedad relativa máxima (%)	60	60	59
Humedad relativa mínima (%)	58	58	57
Altitud máxima (msnm)	2,291	2,264	2,295
Altitud mínima (msnm)	1,626	1,653	2,107
Sombrado máximo (radianes)	2.20	2.25	2.02
Sombreado mínimo (radianes)	0.79	0.90	1.53
Pendiente máxima (radianes)	1.5708	1.5708	1.5707
Pendiente mínima (radianes)	1.5705	1.5706	1.5706
Orientación máxima (radianes)	5.93	4.60	3.45
Orientación mínima (radianes)	4.00	0.80	1.18

Efecto del cambio climático en la superficie de distribución de especies hospedantes y avispa

Con base en el análisis se determinó que la distribución potencial de las especies hospedantes *Q. affinis* y *Q. laurina* son especialmente vulnerables al incremento de la temperatura considerando el escenario de cambio climático canadiense. La combinación de mayor temperatura y menor precipitación proyectada causará una redistribución de la especie hospedante respecto a la superficie potencial actual (Figura 24). La superficie de distribución espacial de las especies de *Quercus* bajo un escenario de cambio climático al año 2030 (Figura 25) proyecta una reducción del 46.1% respecto a la superficie potencial actual en la región. El incremento gradual de la temperatura y la disminución de la precipitación propiciaría también un estrés fisiológico en las especies, haciéndolas más vulnerables al ataque de las plagas.

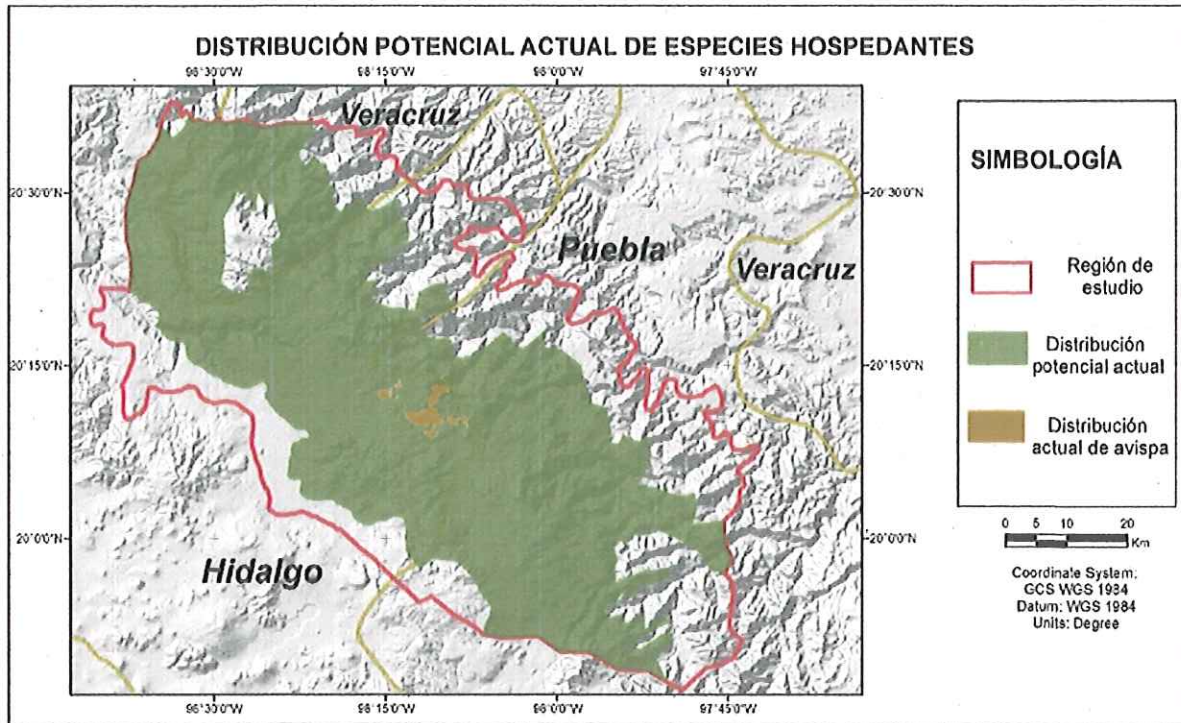


Figura 24. Distribución potencial actual de especies hospedantes (*Q. affinis* y *Q. laurina*) y distribución actual de avispa agalladora.

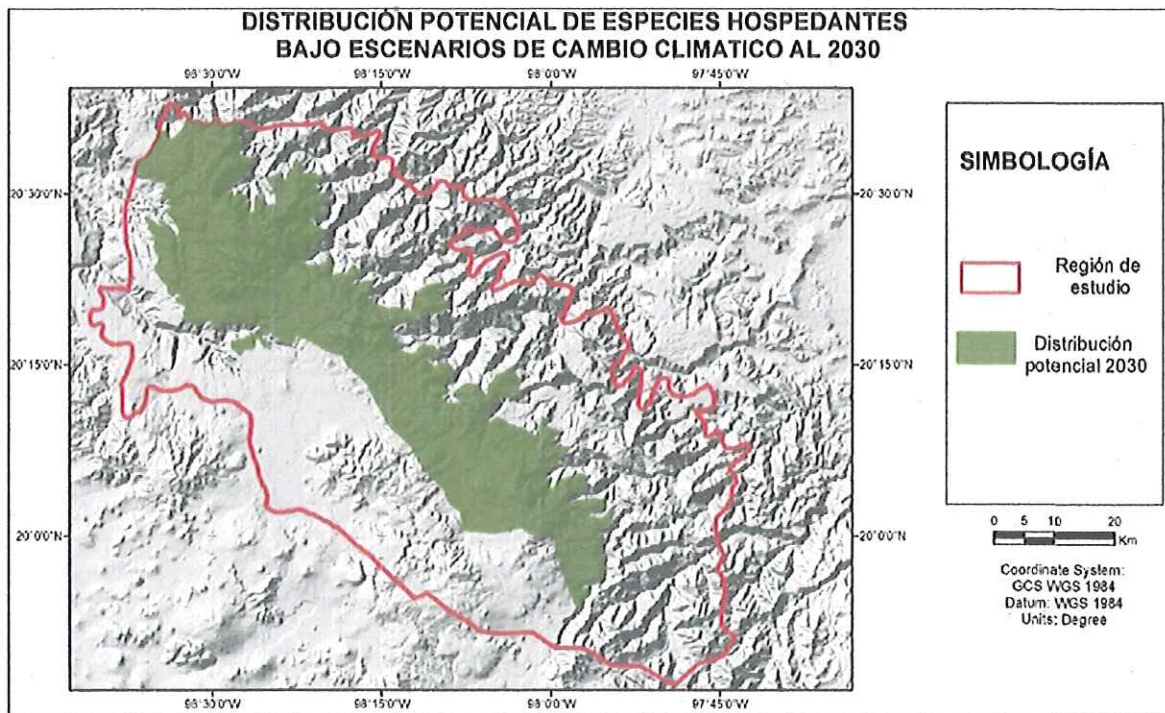


Figura 25. Distribución potencial de especies hospedantes (*Q. affinis* y *Q. laurina*) en el año 2030 con un escenario intermedio de emisiones (RCP4.5).

Por otro lado, la distribución espacial de la plaga (avispa agalladora) presenta otra tendencia bajo escenarios de cambio climático. Actualmente se ha registrado infestación de la avispa en bosques de *Q. affinis* y *Q. laurina* en una superficie entre 2,248 (Figura 24) y 2,750 ha de acuerdo con registros de la CONAFOR¹. Sin embargo, con el escenario intermedio del modelo canadiense se proyecta que la superficie de distribución potencial de la plaga incrementa a 133,318 ha, con diferentes niveles de infestación (Figura 26). La mayor proporción de superficie presentará un nivel de infestación moderado (54.7%), seguido de infestación severa (28.6%). De tal manera que la especie de avispa se ve favorecida por los escenarios de cambio climático principalmente por el incremento de la temperatura. El calentamiento puede potencialmente afectar varios aspectos del ciclo de vida de los insectos. Con aumento de la temperatura, los insectos podrían pasar de sus etapas larvales a adultos más rápido (Menéndez, 2007) y tener mayor sobrevivencia por la deficiencia de bajas temperaturas para eliminarlas. En consecuencia, las respuestas potenciales incluyen cambios en los patrones fenológicos, cambios en la selección del hábitat y expansión y redistribución de los rangos geográficos y altitudinales.

Consistentemente, debido a que la distribución de plagas como la avispa está afectada por variables estacionales como temperaturas mínimas y máximas asociadas al ciclo de desarrollo, la superficie proyectada puede tener alta incertidumbre. Adicionalmente, el cambio en la distribución de las especies hospedantes ha sido afectada por el cambio de uso de suelo y será un factor importante en la distribución potencial de la plaga. Sin embargo, se considera que la tendencia de incremento se mantiene.

¹ Información proporcionada por personal de sanidad forestal de CONAFOR, gerencia estatal Hidalgo. Ing. Vargas Solís.

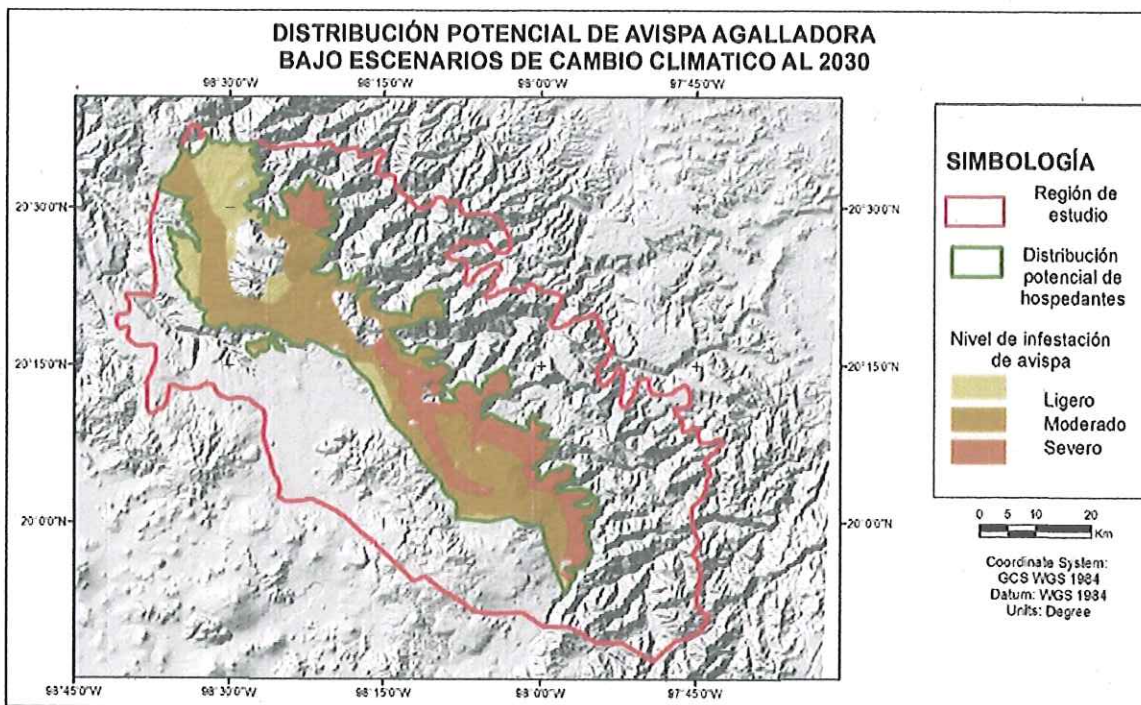


Figura 26. Distribución potencial de avispa agalladora y nivel de infestación en el año 2030 con un escenario canadiense (CGCM3) intermedio de emisiones.

En México los estudios sobre la relación indirecta de los efectos del clima con el incremento de las poblaciones de insectos plaga son escasos, atribuible entre otros factores a la falta de información climática extensa y a la ausencia de registros históricos de brotes de plagas en especial en este grupo de agente causales de daño (Cervantes-Martínez *et al*, 2019).

Es necesario monitorear y dar seguimiento a las plagas forestales (insectos, agentes patógenos y otras plagas) en un entorno de cambios climáticos como resultado del aumento de las temperaturas, cambios en las precipitaciones, acentuación de la frecuencia de los fenómenos extraordinarios como las sequías, heladas, nevadas, caída de granizo y mayores concentraciones de dióxido de carbono. Esto permitirá una mejor caracterización del efecto de las variables climáticas sobre el desarrollo y frecuencia de las plagas forestales, con el fin de apoyar al adecuado manejo de los bosques y diseño de estrategias de adaptación al cambio climático.

Fuentes bibliográficas.

Becerra-López, J. L., Romero-Méndez, U., Ramírez-Bautista, A. & Becerra-López, J. 2016. Revisión de las técnicas para el modelado de la distribución de las especies. *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, **5**, 1514-1525.

Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32.

Cervantes-Martínez, R., Cereno-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V., Méndez-González, L., Castruita-Esparza, L. Brotes históricos de descortezadores en México, Guatemala y Honduras (1895-2015) y su relación con las sequías. 2019. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. XXV, núm. 2. 269-290.

Cibrián-Tovar, D., Álvarez-Solís, H., Aquino-Bolaños, I., Arriola-Pizano, G., Barrera-Ruiz, U., Cibrián-Llenderal, V. & Sánchez-Carreón, M. 2013. Sanidad forestal para la evaluación de la avispa y control de descortezadores, muérdagos y heno motita. México: Universidad Autónoma Chapingo- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Gobierno del estado de Hidalgo. 78 p.

Cicese 2018. Climating Computing Program (CLICOM). *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.*, 5/Octubre/2018.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. & Böhner, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 1991-2007.

Díaz, J. D. G., Rivas, A. I. M. & Rueda, J. Á. T. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, **13**, 29-49.

García, Y. B. & Sierra Villagrana, A. E. 2018. Manual de zonificación ecológica de especies forestales y aplicación de modelos de simulación del efecto del cambio climático. 2014-2018. Comisión Nacional Forestal. SEMARNAT.

Gaucin, D. O. 2014. Sequía en México y Estados Unidos de América: diferencias esenciales de vulnerabilidad y enfoques en la atención al fenómeno. *Frontera norte*, **26**, 3.

Gómez-Mendoza, L. & Galicia, L. 2010. Temperate forests and climate change in Mexico: from modelling to adaptation strategies. *Climate change and Variability. SCIYO, Croatia*, 195-210.

Inegi-Conabio-Ine. 2008. *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) -Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) - Instituto Nacional de Ecología (INE).

Inegi. 2013. *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Aguascalientes, Ags., México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Melika, G., Cibrián-Tovar, D., Cibrián-Llenderal, V., Tormos, J. & Pujade-Villar, J. 2009. New species of oak gallwasp from Mexico (Hymenoptera: Cynipidae: Cynipini)-a serious pest of *Quercus laurina* (Fagaceae). *Dugesiana*, **16**, 67-73.

Menéndez, R. 2007. How are insects responding to global warming? *Tijdschrift voor Entomologie*, **150**, 355.

Moore, B. & Allard, G. 2008. Climate change impacts on forest health. *Forest Health and Biosecurity Working Papers (FAO)*.

Prieto González, R., Cortés Hernández, V. & Montero Martínez, M. 2011. Variability of the standardized precipitation over Mexico under the A2 climate change scenario.

R Development Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. 3.3.3 ed. ISBN 3-900051-07-0, <https://www.r-project.org/>, Vienna, Austria.: R Foundation for Statistical Computing.

Sáenz-Romero, C. 2014. *Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático*, Zapopan, Jalisco, Comisión Nacional Forestal.

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J. & Richardson, B. A. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, **102**, 595-623.

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P. & Lindig-Cisneros, R. A. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, **275**, 98-106.

Sturrock, R., Frankel, S., Brown, A., Hennon, P., Kliejunas, J., Lewis, K., Worrall, J. & Woods, A. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, **60**, 133-149.

Svoboda, M., Hayes, M. & Wood, D. 2012. Standardized precipitation index user guide. *World Meteorological Organization Geneva, Switzerland*.

Valencia, A. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la sociedad Botánica de México*.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D. & Carroll, C. 2016. Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PLoS One*, **11**, e0156720.

Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D. & Carroll, C. 2018. ClimateNA v5.60. A program to generate climate normal, annual, seasonal and monthly data for historical and future periods in North America. 10.