



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

LA TELEDETECCIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR EL SALIVAZO *Ocoaxo cardonai* Castro A BOSQUES DE PINO Y SU DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA POTENCIAL

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

Luis Ángel Cruz González



APROBADA



Bajo la supervisión de:

Dr. David Cibrián Tovar

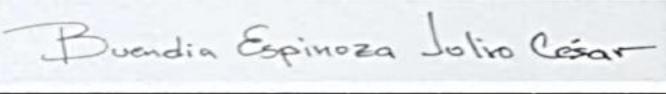
**LA TELEDETECCIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR EL SALIVAZO
Ocoaxo cardonal Castro A BOSQUES DE PINO Y SU DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA
POTENCIAL.**

Tesis realizada por **LUIS ÁNGEL CRUZ GONZÁLEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: 

DR. DAVID CIBRIÁN TOVAR

ASESOR: 

DR. JULIO CESAR BUENDÍA ESPINOZA

ASESOR: 

DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

CONTENIDO

.....	1
ÍNDICE DE CUADROS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
DEDICATORIA	8
AGRADECIMIENTOS	9
DATOS BIOGRÁFICOS.....	10
RESUMEN GENERAL.....	11
GENERAL ABSTRACT.....	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. REVISIÓN DE LITERATURA	15
3.1 El salivazo de los pinos como plaga forestal.	15
3.3 La Teledetección satelital en el estudio de la sanidad forestal	19
3.3.2 Fusión de imágenes multiespectrales.....	20
3.3.3 Reflectividad de la vegetación en el espectro electromagnético	21
3.3.4 Índices de vegetación	22
3.4 Series temporales	23
3.4.1 Series de tiempo en la teledetección	23
3.4.2 Prueba Pettitt.....	24
3.4.3 Prueba Mann Kendall	24
3.4.4 Prueba de Theil- Sen.....	25

3.5 Sequia.....	25
3.5.1 Sequia Meteorológica.....	26
3.5.2 Sequía hidrológica.....	27
3.5.3 Sequía agrícola.....	28
3.5.4 Sequía socioeconómica.....	28
3.5 Modelado de nicho ecológico.....	29
3.7 Literatura citada.....	30
4. Análisis de la variación espacio temporal del bosque de pino afectado por el salivazo <i>Ocoaxo cardonai</i> en dos microcuencas del Rio Tecolutla.....	36
4.1 Resumen.....	36
4.2 Abstract.....	37
4.3 Introducción.....	38
4.4 Objetivo.....	39
4.5 Materiales y métodos.....	40
4.5.1 Descripción del área de estudio.....	40
4.5.2 Obtención de los datos para la elaboración de series de tiempo....	41
4.5.3 Análisis estadístico.....	41
4.5.4 Zonas de monitoreo y validación.....	42
4.6 Resultados.....	43
4.6.1 Tendencias y Puntos de cambio de las series de tiempo de los NDVI y de los factores climáticos.....	43
4.6.4 Patrones espaciales de las tendencias en la vegetación afectadas por el <i>Ocoaxo cardonai</i>	48
4.8 Conclusión.....	50
4.9 Literatura citada.....	51

5. MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA POTENCIAL DE <i>Ocoaxo cardonai</i> Castro UTILIZANDO VARIABLES CLIMÁTICAS Y TOPOGRÁFICAS	55
5.1 Resumen	55
5.2 Abstract.....	56
5.3 Introducción	57
5.4 Objetivo.....	58
5.5 Materiales y métodos.....	58
5.5.1 Localización del área de estudio	58
5.5.2 Obtención de los datos de ocurrencia	59
5.5.3 Variables ambientales	60
5.5.4 Modelado de nicho ecológico.	60
5.5.5 Validación	62
5.6 Resultados y discusiones	62
5.7 Conclusiones	69
5.8 Literatura citada	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tendencias del NDVI, SPI y variables climatológicas utilizando el estimador de Theil-sen y prueba de MK en las microcuencas de estudio	43
Cuadro 2. Tendencias del NDVI, SPI y variables climatológicas utilizando el estimador de Theil-Sen y prueba de MK en la cuenca de estudio.	46
Cuadro 3. Porcentaje de contribución de las biovariables al modelo de nicho ecológico.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Daños por adultos del salivazo de los pinos <i>Ocoaxo cardonai</i> . Tetela de Ocampo, Puebla. 2015.	14
Figura 2. Polígonos (en rosa) infestados por el salivazo de los pinos en la Sierra Norte de Puebla	16
Figura 3. Adulto de <i>Ocoaxo cardonai</i> Castro, sobre acículas de <i>Pinus oaxacana</i> . Tetela de Ocampo, Puebla, 2016.	17
Figura 4. Daño por alimentación de adultos de <i>Ocoaxo cardonai</i> en <i>Pinus oaxacana</i>	18
Figura 5. Ninfas de <i>Ocoaxo cardonai</i> Castro sobre raíces de pino	18
Figura 6. Diagrama BAM, describe interacciones entre factores bióticos (B), abióticos (A) y de movimiento (M).	29
Figura 7. Localización del área de estudio	40
Figura 8. Microcuencas del Río Tecolutla	59
Figura 9. Registro de ocurrencia de <i>Ocoaxo cardonai</i>	63
Figura 10. Distribución potencial de <i>Ocoaxo cardonai</i> en México	66
Figura 11. Distribución potencial <i>Ocoaxo cardonai</i> en las microcuencas de estudio.	67
Figura 12. Curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas para generar los modelos de distribución geográfica potencial de <i>Ocoaxo cardonai</i> . Media de las 100 réplicas (rojo) +/- desviación estándar (azul).	69

DEDICATORIA

A mis padres, Catalina González y Floriberto Cruz por creer en mí, apoyo incondicional y ser parte de mi formación durante toda esta trayectoria llamada vida que sin duda me han hecho ser mejor persona cada día durante toda mi existencia.

A mi hermana Fátima y a mi familia cercana por estar siempre para mí y por su apoyo desde que partí de mi pueblo de residencia, muchas gracias.

A los académicos, por sus conocimientos y experiencias compartidas durante el posgrado, que sin duda me han hecho crecer como profesionalista y como persona.

A las personas que estuvieron durante el posgrado, compañeros y amigos que hicieron de esta etapa de formación

A Esmeralda Hernández, por alentarme y aconsejarme durante el trayecto de este proyecto llamado posgrado. Por todo su cariño y comprensión convirtiéndose uno de los pilares de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo (UACH)**. Mi alma mater.

Al **Dr. Julio César Buendía Espinoza** por sus conocimientos y tiempo brindado durante mi formación durante el posgrado; así como la ayuda y guía durante la realización de la presente tesis de investigación.

Al **Dr. David Cibrián Tovar** por sus consejos, conocimientos y tiempo brindados durante la maestría y en la elaboración de la investigación.

Al **Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas** por su tiempo y recomendaciones en este trabajo de investigación.

A la **coordinación de posgrado** por el apoyo y seguimiento de mi formación durante el posgrado.

A la **Ing. Fabiola Padilla** por su ofrecer las bases de datos que ayudaron en la realización de la presente tesis.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Luis Ángel Cruz González

Fecha de nacimiento: 11 de enero de 1994

Lugar de nacimiento: Tizapán, Álvaro Obregón, Distrito Federal

CURP: CUGL940111HDFRNS02

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables.

Desarrollo académico

Originario de la ciudad de México, quien desarrolló sus estudios de bachillerato en un plantel de colegio de bachilleres del estado de Oaxaca. En el 2012 inició sus estudios en la Universidad Autónoma Chapingo, donde desarrolló sus estudios de licenciatura en el Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, obteniendo el título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables con la tesis titulada “Evaluación y propuestas de obras de conservación de agua y suelos en el parque nacional Molino de Flores”. En la primavera del 2019 ingresó al programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.



RESUMEN GENERAL

Las plagas forestales ocasionan daños a los árboles, como el amarillamiento y la caída prematura de las acículas, como lo sucedido en la Sierra Norte de Puebla, en los años 2011 y 2017 por la plaga *Ocoaxo cardonai* Castro afectando hectáreas de bosque de pino. Por ello, se analizó la dinámica de la vegetación en dos microcuencas, en la Sierra Norte de Puebla, para el periodo 2000-2019, utilizando datos de series temporales NDVI y de variables climáticas, para detectar y cuantificar áreas afectadas por el “salivazo del pino”. Las series de tiempo se extrajeron de la plataforma Landsat y Terraclimate. Sus tendencias se calcularon mediante el estadístico Mann Kendall y Theil-Sen y puntos de cambio en el NDVI con el estadístico Pettitt. De igual manera se estimó la distribución potencial del *Ocoaxo cardonai* Castro en México, mediante el modelado de nicho ecológico mediante MaxEnt, para la identificación temprana de posibles infestaciones. Se realizó un análisis general del área de estudio. Las temperaturas máximas (0.001), mínimas (0.004), medias (0.061) y el NDVI (0.0004) mostraron tendencias crecientes mientras que la precipitación (-0.0252) y humedad del suelo (-0.0341) mostraron tendencias decrecientes; siendo todas significativas a excepción de la temperatura máxima. Se identificaron dos puntos de cambio dentro de la serie NDVI, en los periodos 2010 a 2014 y 2016 a 2019 mostrando disminuciones en los valores del NDVI. El análisis de cambios de la vegetación periodo 2010-2019, reveló disminuciones en el NDVI a nivel de píxel en 1747.94 ha de vegetación. Las afectaciones se corroboraron mediante polígonos de monitoreo realizados en las áreas de estudio. En cuanto al modelado de nicho ecológico, el mejor modelo seleccionado fue aquel con un AUC = 0.9961. Se seleccionaron ocho variables, las que mejor explicaran la presencia de *Ocoaxo cardonai*, siendo la de mayor contribución: el rango medio diurno con 26.30 % seguido de la elevación con 21.34%, según la prueba Jackknife. La distribución potencial que mostró la especie de estudio fue en regiones montañosas del centro y este de México. El 87 % de la superficie monitoreada se encuentran dentro de las áreas de distribución potencialmente alta y el restante 12 % en áreas de distribución nula, mostrando la precisión del modelado.

Palabras clave: Plaga forestal, *Pinus oaxacana*, percepción remota

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Autor: Luis Ángel Cruz González. Director de tesis: David Cibrián Tovar.

GENERAL ABSTRACT

Forest pests cause damage to trees, such as yellowing and premature needle drop, as what happened in the Sierra Norte de Puebla, in the years 2011 and 2017 by the pest *Ocoaxo cardonai* Castro affecting hectares of pine forest. Therefore, vegetation dynamics were analyzed in two micro-watersheds, in the Sierra Norte de Puebla, for the period 2000-2019, using NDVI time series data and climatic variables, to detect and quantify areas affected by the "pine spittlebug". The time series were extracted from the Landsat and Terraclimate platform. Their trends were calculated using the Mann Kendall and Theil-Sen statistics and NDVI change points with the Pettitt statistic. Likewise, the potential distribution of *Ocoaxo cardonai* Castro in Mexico was estimated by means of ecological niche modeling using MaxEnt, for the early identification of possible infestations. A general analysis of the study area was carried out. Maximum (0.001), minimum (0.004), mean (0.061) and NDVI (0.0004) temperatures showed increasing trends while precipitation (-0.0252) and soil moisture (-0.0341) showed decreasing trends; all being significant except for maximum temperature. Two points of change were identified within the NDVI series, in the periods 2010 to 2014 and 2016 to 2019 showing decreases in NDVI values. The analysis of vegetation changes period 2010-2019, revealed decreases in NDVI at the pixel level in 1747.94 ha of vegetation. The effects were corroborated by monitoring polygons carried out in the study areas. Regarding ecological niche modeling, the best model selected was the one with an AUC = 0.9961. Eight variables were selected to best explain the presence of *Ocoaxo cardonai*, the greatest contribution being: the mean diurnal range with 26.30%, followed by elevation with 21.34%, according to the Jackknife test. The potential distribution shown by the study species was in mountainous regions of central and eastern Mexico. Eighty-seven percent of the monitored area is within the areas of potentially high distribution and the remaining 12% in areas of null distribution, showing the accuracy of the modeling.

Key Word: Plaga forestal, *Pinus oaxacana*, percepción remota

¹Thesis Master of Science in Forestry Sciences, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Luis Ángel Cruz González. Advisor: David Cibrián Tovar.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La salud del bosque se ve reflejada en su capacidad de adaptación, sensibilidad a estímulos y resiliencia frente a perturbaciones bióticas y abióticas; para una mejor comprensión del concepto, se menciona la definición de Salud Forestal provista por Manion y Griffith (2001): “un ecosistema forestal es saludable, sostenible y maduro cuando mantiene una estabilidad de la relación entre estructura y tamaño, por medio del balance entre su crecimiento y su mortalidad”. La perturbación forestal es cualquier evento que causa debilitamiento o mortalidad del arbolado (Hansen *et al.*, 2010; Masek *et al.*, 2013), perturbaciones consecutivas o de largo plazo pueden conducir a un decaimiento forestal (Navarro *et al.*, 2007).

La teledetección espacial es una técnica basada en la obtención de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas espaciales (satélites); para que esto ocurra debe haber una interacción entre la tierra y el sensor de forma energética, ya sea por la reflexión de la energía solar o de un haz de energía artificial (Chuvieco 1990). El procesamiento digital de imágenes espectrales, multiespectrales e hiperespectrales, detecta las perturbaciones o cambios en la vegetación a través del tiempo y del espacio, ocasionadas por causas naturales, por ejemplo: sequías prolongadas y plagas de insectos, o antropocéntricas como contaminación del aire o incendios provocados; para su análisis se utilizan operaciones matemáticas que realcen las diferentes coberturas de interés por el usuario (Hall *et al.*, 2016). La estratificación del paisaje forestal por medio de mapas, apoyados por programas de prospección aérea que monitorean el espacio, proporcionan estadísticas sobre áreas, tendencias de la vegetación e impactos por plagas forestales (Hall *et al.*, 2016). Enfrentarse al creciente impacto de las perturbaciones forestales bajo el escenario de cambio climático, se necesitará el perfeccionamiento de un sistema novedoso—de monitoreo de la salud forestal, de las cuales, la teleobservación desempeñará un papel cada vez más importante (McDowell *et al.*, 2015).

El salivazo de los pinos, *Ocoaxo cardonai* Castro, afectó negativamente la salud de los bosques de pino en la Sierra Norte de Puebla. Según el informe del Plan de Contingencia Fitosanitaria Forestal de CONAFOR (Cibrián *et al.* 2016), a partir del 2013, se tuvieron más de 2000 ha afectadas; los principales síntomas fueron el cambio de color del follaje y la caída prematura del mismo (Figura 1). Para 2015, la infestación alcanzó más de 3500 ha afectado *Pinus pseudostrobus*, *P. oaxacana* y *P. patula*. Debido al rápido aumento de la población del salivazo del pino, *Ocoaxo cardonai*, se aplicaron diversas medidas para el combate en algunas áreas del bosque afectado.



Figura 1. Daños por adultos del salivazo de los pinos *Ocoaxo cardonai*. Tetela de Ocampo, Puebla. 2015.

De acuerdo con Pichardo *et al.*, (2017) los signos y síntomas observados en recorridos en campo se determinó la presencia del insecto del género *Ocoaxo* en árboles de pino que sufrían cambio de color en follaje y declinación en salud.

Como se desconocía la intensidad y la extensión total del daño ocasionado por la plaga, se realizó el presente trabajo de investigación, utilizando datos espaciales para identificar la intensidad del daño en la zona de afectación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las áreas afectadas por *Ocoaxo cardonai* Castro en la vegetación arbórea afectada mediante teledetección satelital, así como su distribución geográfica mediante un modelado de nicho ecológico

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar la dinámica y la tendencia de la vegetación; así como las afectaciones del salivazo del pino en el bosque mediante la implementación de series de tiempo de imágenes satelitales.
2. Estimar la distribución potencial geográfica del *Ocoaxo cardonai* Castro mediante el modelado de nicho ecológico.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El salivazo de los pinos como plaga forestal.

En los recorridos y muestreos en las Sierra Norte de Puebla se registró la presencia de *Ocoaxo cardonai* Castro en los municipios de Aquixtla, Tetela de Ocampo, Xochiapulco y Zautla, Las infestaciones fueron perceptibles desde el aire, en la figura 1 se muestra la distribución reconocida por la Comisión Nacional Forestal en 2016.

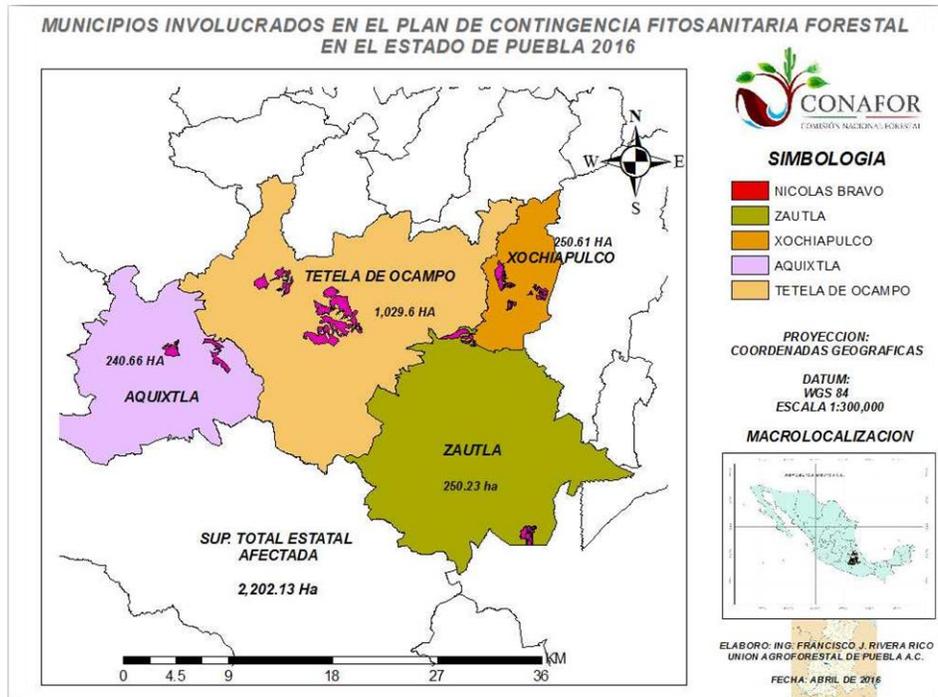


Figura 2. Polígonos (en rosa) infestados por el salivazo de los pinos en la Sierra Norte de Puebla

Debido a la importancia de la plaga en 2016 se desarrolló el Plan de Contingencia Fitosanitaria Forestal, lográndose nuevos conocimientos de la identidad del organismo causal, su biología y sus daños.

3.1.1. Identidad y distribución de *Ocoaxo cardonai* Castro.

Este insecto se desconocía en su identidad específica (figura 2). Castro *et al.* 2018 lo describieron y le pusieron nombre; estos autores al revisar las colecciones entomológicas de México y de otros países, identificaron que la especie estuvo recolectada de los Estados: Ciudad de México, Coahuila, Estado de México, Michoacán, Nuevo León, Puebla, Oaxaca, Querétaro y San Luis Potosí; sin embargo, solo en Puebla se tuvo importancia como plaga forestal.



Figura 3. Adulto de *Ocoaxo cardonai* Castro, sobre acículas de *Pinus oaxacana*. Tetela de Ocampo, Puebla, 2016.

3.1.2. Ciclo biológico y daños de *Ocoaxo cardonai* Castro.

Los datos del ciclo biológico fueron obtenidos en estudios consecutivos de Vianey 2017 y de Lara 2018; se indica que presenta una generación por año. Durante la temporada de lluvias, de finales de julio a septiembre, los adultos emergen del suelo, son buenos voladores con actividad diurna y parcialmente nocturna. Se alimentan durante dos o tres semanas de las acículas, haciendo un daño en forma de banda necrosada que al ser abundante genera un cambio de color de acícula (figura 3), al ser miles de individuos alimentándose al mismo tiempo se cambia el color de la copa del árbol y muchas acículas caen prematuramente.



Figura 4. Daño por alimentación de adultos de *Ocoaxo cardonai* en *Pinus oaxacana*.

Las hembras copuladas regresan al suelo para ovipositar a varios centímetros de profundidad, los huevos quedarán en reposo, hasta junio, julio o agosto del siguiente año en que emergen las ninfas. Éstas permanecen a varios centímetros de profundidad en el suelo, son vida libre, pero siempre dentro de una masa de “saliva” espumosa, pueden estar solas o en pequeños grupos de hasta cinco individuos. Se alimentan de las raíces de pinos, haciendo lesiones necróticas en el sitio de penetración del estilete (figura 4)



Figura 5. Ninfas de *Ocoaxo cardonai* Castro sobre raíces de pino

Durante su alimentación las ninfas inyectan saliva y sustancias que degradan el tejido vegetal y el daño persiste después de abandonar el daño (Valério y Nakano, 1992, citado por Castro, 2017).

Otra especie muy relacionada con *Ocoaxo cardonai* es *O. assimilis*, la cual fue detectada en *Pinus oaxacana* Mirov en el municipio de Nicolás Bravo, Puebla. Cid-Muñoz *et al.* 2020 realizaron un estudio básico de la biología y comportamiento de esta especie, fue similar a lo observado para *O. cardonai*.

3.3 La Teledetección satelital en el estudio de la sanidad forestal

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. En el sentido amplio, la teledetección no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación (Chuvieco, 1990).

La teledetección espacial se define como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en últimas instancias, ser interpretadas para una determinada aplicación (Chuvieco, 1990).

El monitoreo y la puntualización la mortalidad son actividades muy complejas, son múltiples los factores causales de un determinado síntoma en un árbol, por lo cual es necesario entender y cartografiar las interacciones de las plagas. El monitoreo de la disminución de la vegetación y su mortalidad se ha efectuado en gran medida con la aplicación de técnicas de teleobservación multitemporales y multiespectrales, que son herramientas eficaces para la detección y el estudio de

la dinámica de la vegetación de forma económica, periódica y rápida (Trujillo & Navarro,2019).

La estimación del estado de salud de un bosque es el principal objetivo de un inventario de daños forestales a pequeña escala (a unos cientos de km) y también regionales (todo un país). Para lo dicho, se necesita aplicar un conjunto de procesos, de los cuales la teledetección satelital (Ts) es un instrumento muy aplicado para la detección, estimación y monitoreo de cambios que suceden en la cobertura forestal, como sucede con la defoliación por enfermedades y plagas (Franklin, 2001; Adelabu *et al.*, 2012).La Ts se utiliza para representar el decaimiento en el estado de salud de los bosques, incluyendo los cambios en el metabolismo, problemas en la reproducción, senescencia temprana, cambios en el color, alteraciones en el crecimiento, caída temprana de las hojas y por último la muerte del árbol (Radeloff *et al.*, 1999).

Algunos métodos de identificación de cambios novedosos utilizan transformaciones en la imagen, como lo son: el análisis de componentes principales (PCA) descrito por (Gong, 1993), la transformación Gramm-Sclunidt (Collins & Woodcock, 1994) para la fusión de imágenes; o la transformación Tasseled Cap descrita por (Collins & Woocock, 1996). La aplicación de modelos para la detección de cambios en la cobertura terrestre parte del modelo de reflectancia de cubiertas de Li-Strahler (Macomber & Woodcock, 1994) y del análisis cambio-vector (Lambin & Strahler, 1994).

Muchos de los casos de estudio mencionados han conseguido como producto clasificaciones muy precisas usando una única imagen (Franklin & Raske, 1994), sin embargo, excepcionales resultados se han obtenido a partir de series multitemporales de imágenes (Franklin *et al.*, 1995).

3.3.2 Fusión de imágenes multiespectrales

Desde el punto de vista multidisciplinario general y popular, la fusión de datos, combina información de diversas fuentes para el mejorado de los valores

potenciales y los rendimientos de interpretación de los datos de origen, y para realizar una descripción visible de la calidad superior de los datos (Zhang, 2010).

De acuerdo con Zhang (2010), el Pansharpening radica en fusionar imágenes multispectrales múltiples con una resolución espacial considerada baja y otra imagen la cual debe ser pancromática (PAN) con una mayor resolución espacial que la primera, el resultado muestra una imagen con la resolución espectral de la primera con la resolución espacial de la segunda.

La técnica de fusión de imágenes más usual es aquella que utiliza el algoritmo transformación intensidad-tono-saturación (IHS); emplea una imagen PAN de resolución espacial alta para sustituir el componente de intensidad y el resultado es la imagen fusionada empleando una transformación IHS inversa. (Carper *et al.*, 1990)

3.3.3 Reflectividad de la vegetación en el espectro electromagnético

Cuando la radiación solar incide sobre un material, una parte de esta se refleja en la parte más superficial del mismo y el resto se propaga por su interior. Allí, parte es absorbida y el resto sufre un proceso de dispersión (en todas direcciones) de tal modo que parte de la energía dispersada emerge del material por la misma superficie por la que penetró, sumándose así a la radiación reflejada en la capa superficial (Gilabert *et al.*, 1997). La suma de ambas contribuciones conforma la radiación reflejada por la superficie del material en conjunto con la irradiancia, permite definir la reflectividad espectral del mismo R_λ . La reflectividad del espectro está estrechamente relacionada con el origen del material (características de absorción en función de los constituyentes químicos de los materiales) lo que posibilita el reconocimiento de materiales en teledetección (Gilabert *et al.*, 1997).

Gilabert *et al.*, (1997) dan a conocer que la reflectividad de las diferentes cubiertas vegetales está determinada, juntamente con los factores externos expuestos anteriormente, por las características ópticas y la forma como se

distribuye en el espacio de todos sus constituyentes (incluyendo el suelo sobre que está la vegetación), así como su tamaño. El problema por superar de la teledetección se basa en estudiar a las diferentes coberturas vegetales de una escena a partir de medidas de reflectividad incorrelacionadas de los factores que perturban a la señal radiométrica, uno de los más importantes, la reflectividad del suelo.

La solución del problema anterior se ha abordado tradicionalmente en Teledetección a partir del diseño de los denominados índices de vegetación.

3.3.4 Índices de vegetación

Los índices de vegetación reciben ese nombre porque para su cálculo necesitan valores de reflectividad en "bandas anchas" de unos cientos de nanómetros, es decir, reflectividad que detectan habitualmente los sensores remotos de los satélites en operación (Gilabert *et al.*, 1997).

Los índices son un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas en los valores de carácter numérico de los píxeles que conforman una imagen, utilizando uno o más bandas que pertenecen a una misma escena; el cual puede ser definido como un parámetro que se estima a partir de los valores de reflectancias en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético y que es sensible a la cobertura de la vegetación (Gilabert *et al.*, 1997).

En los índices de vegetación, los valores bajos por lo general muestran vegetación poco vigorosa, al contrario de los valores altos en los índices, los cuales muestran vegetación vigorosa. Índices como lo son el "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) y el "Soil Adjusted Vegetation Index" (SAVI) en las interacciones múltiples entre la vegetación y el espectro electromagnético de las bandas del espectro rojo e infrarrojo (Muñoz, 2013).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Descrito por primera vez por Rouse *et al.*, (1973), tiene la ventaja de que solo varía de -1 a +1. La ecuación es Infrarrojo - rojo / infrarrojo + rojo. El algoritmo que muestra la fuerza y la vitalidad de la vegetación en la superficie de la tierra. Tanto más activa es la clorofila de las plantas, tanto más grande es el aumento del nivel de reflexión en el infrarrojo cercano (0,78 - 1 μm). Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse *et al.*, 1974).

3.4 Series temporales

3.4.1 Series de tiempo en la teledetección

Las series de tiempo utilizando datos de imágenes satelitales se utilizan para estimar y evaluar los cambios espacio temporales que suceden en la superficie de la tierra.

Las imágenes espectrales de series de tiempo introducidas por Van Der Weerd y Kazarian (Weerd & Kazarian,2007) y revisadas por Gowen *et al.*, (2011), han atraído un creciente interés porque la información espectral, espacial y temporal se adquiere simultáneamente (Xu *et al.*, 2021). Las imágenes espectrales de series de tiempo se definen como un conjunto de imágenes espectrales apiladas adquiridas de la misma muestra en diferentes puntos de tiempo. Las imágenes espectrales permiten analizar la variación espectral y espacial, las imágenes de series de tiempo incluyen una dimensión temporal para el análisis, de tal forma ampliar la comprensión de fenómenos subyacentes a los procesos dinámicos que suceden en la muestra (Xu *et al.*, 2021).

En los últimos años, la utilización de imágenes de satélite de baja resolución espacial ha ido en aumento, se usan para monitorear la vegetación en escalas pequeñas de tiempo; una desventaja de estas imágenes es su baja resolución temporal (Ceroni *et al.*, 2015).

Para el monitoreo y estudio de la vegetación a través del espacio y del tiempo, los índices de vegetación se han convertido en una gran fuente de información (Ceroni *et al.*, 2015).

La detección de cambios y el análisis de tendencias son las pruebas estadísticas que se realizan comúnmente en este tipo de series de tiempo el cual utiliza datos ambientales.

3.4.2 Prueba Pettitt

Es utilizada para la detección de cambios abruptos en la serie de tiempo. Es una prueba que hace caso omiso de la normalidad, no paramétrica, que se basa en rangos. Su fundamento está en el orden de rangos de los valores y_i . El estadístico que se usa se determina como:

$$X_d = 2 \sum_{i=1}^d r_i - d * (n + 1) \text{ para } d = 1, 2, \dots, n$$

y un valor en el año m que cumple la condición:

$$X_m = \max_{1 \leq d \leq n} |X_d|$$

es una variación fuerte en la serie (Pettitt, 1979).

3.4.3 Prueba Mann Kendall

La prueba para el análisis de tendencias Mann Kendall es una prueba no paramétrica, basado en rangos, es robusta a los valores atípicos y no toma en cuenta la normalidad de los datos. La hipótesis nula de dicha prueba dice que los datos son independientes y aleatoriamente ordenados; y como alternativa que si la hay. El cálculo de la prueba se lleva a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j)$$

Si S es positivo se deduce que la tendencia es creciente, todo contrario si fuese negativo.

Con base en los indicadores, se estima una varianza para el estadístico S de Mann Kendall que considera el caso de los empates $(X_j - X_k) = 0$ obtenidos en el paso 2, mediante la ecuación:

$$var(s) = \frac{1}{18} [n(n-1) * (2n+5) - \sum_{q=1}^g t_q(t_q-1) * (2t_q+5)]$$

Y el cálculo del estadístico Z con:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[var(s)]^{1/2}} & si > 0 \\ 0 & si S = 0 \\ \frac{S+1}{[var(s)]^{1/2}} & si < 0 \end{cases}$$

Cuyas hipótesis se evalúan con el estadístico Z; las cuales nos dicen que:

- a) H0 no hay tendencia
- b) H1 hay tendencia decreciente o creciente

3.4.4 Prueba de Theil- Sen

La prueba de Theil-Sen es un estadístico basado en el análisis de la tendencia de la mediana, el cual puede ser considerado robusto (Theil, 1950; Sen, 1968; Hoaglin *et al.*, 2000). Calcula la mediana de las pendientes entre todas las combinaciones de pares $n(n-1) / 2$ de los datos de la serie de tiempo. Es un estadístico que hace caso omiso al tipo de distribución de los datos siendo eficaz para la estimación de tendencias de series pequeñas. (Hoaglin *et al.*, 2000).

3.5 Sequia

Valiente (2001) menciona que el término sequía ha sido centro de innumerables estudios científicos, sin embargo, las múltiples tipologías climáticas que existen

hacen muy difícil el utilizar el mismo umbral de deficiencia pluviométrico en dos zonas distintas. Por ende, se han establecido diferentes definiciones que complican la comparación de sus magnitudes.

Lobato (2016) señala que una definición aceptable de sequía por el Monitor de Sequias de México (MSM) es una modificación presentada por Frick & Salas (1990): *“Una sequía se define como un período sostenido de baja precipitación tal que el agua disponible de embalses, escurrimientos acuíferos y fuentes externas no cumplen con las necesidades de los usuarios de la cuenca”*

Así mismo Valiente (2001) menciona que Wilhite & Glantz (1985) identificaron más de 150 diferentes definiciones y que las agruparon en cuatro grandes grupos, tomando en cuenta la aplicación científica quien analiza un fenómeno determinado: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica.

3.5.1 Sequia Meteorológica

Son expresiones que se encuentra sustentada en datos climáticos, las cuales se sustentan en “la desviación de la precipitación respecto a la media durante un período de tiempo determinado” (Valiente, 2001).

Palmer (1965) define a este tipo de sequía como *“intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climáticamente esperado o del aporte de humedad apropiado”*.

Así mismo Palmer (1965), en su estudio que tituló “Metereological Drought” desarrolló uno de los primeros índices para la identificación y cuantificación de la sequía y su severidad, el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PSDI).

Lobato (2016) citando a (Weber & Nkemdirim, 1998). agrega que dicho índice se utiliza para la estimación de la duración e intensidad de las sequias de periodo largo. Para el cálculo del PSDI se estiman los valores históricos, actuales y

esperados de los cuatro primeros parámetros (precipitación, evapotranspiración, pérdida y recarga de humedad), de preferencia a escalas mensuales; se estiman los coeficientes realizando un cociente entre los valores medios observados y los esperados; con estos coeficientes y las series de tiempo se calcula la cantidad de humedad normal por mes utilizando la ecuación para balance hídrico, tomando en cuenta que la precipitación está en función con el escurrimiento, escorrentía que rebasa la raíz de la planta, evapotranspiración, cantidad de agua presente tanto en el suelo como en la planta.

3.5.2 Sequía hidrológica

Es definida como la disminución del caudal superficial de los cursos de agua y, en consecuencia, produce una disminución de los volúmenes almacenados en las estructuras hidráulicas y una reducción del nivel natural del agua subterránea (Bergaoui & Alouini,2001). Para su cuantificación, se han elaborado diversos índices que miden la sequia hidrológico, siendo el más conocido y utilizado, el Índice de precipitación estandarizado (SPI).

Índice de precipitación estandarizado

Este índice fue desarrollado en 1993 (McKee *et al.*, 1993), para caracterizar las brechas de la precipitación para un periodo. Este índice refleja el impacto de la sequia en la disponibilidad de los recursos hídricos; siendo calculado comúnmente cuando la precipitación se distribuye de manera anormal, para periodos inferiores a 12 meses (Bergaoui & Alouini,2001). Siendo expresado matemáticamente:

$$SPI = (P_i - P_m) / \sigma (V)$$

Se puede establecer una definición funcional y cuantitativa de la sequía para cada escala temporal usando el SPI. Un evento de sequía para la escala temporal i se define aquí como un periodo en el que el SPI es continuamente negativo y el SPI alcanza un valor de $-1,0$ o menos. La sequía comienza cuando el SPI cae por

primera vez por debajo de cero y termina con el valor positivo del SPI tras un valor de -1,0 o menos (McKee *et al.*, 1993).

La intensidad de la sequía se define arbitrariamente para los valores del SPI con las siguientes categorías (McKee *et al.*, 1993): sequia leve (0- -0.9), sequia moderada (-1.0- -1.49), sequia severa (-1.5 – 1.99) y sequia extrema (< o igual - 2.0)

3.5.3 Sequía agrícola

Sucede cuando la cantidad de precipitación y su distribución, las reservas del agua en suelo y las pérdidas debidas a la evaporación se combinan para causar disminuciones considerables del rendimiento de los cultivos y del ganado (Batista, 2016). En la agricultura, la sequia no comienza cuando hay un periodo sin lluvias, sino cuando las raíces de los cultivos no pueden obtener el agua del suelo, lo cual depende mas de la humedad del suelo que del régimen de lluvias (Batista, 2016). Considerando lo anterior, existe sequía agrícola, cuando la humedad del suelo en la rizosfera se encuentra en un nivel tal que limita el crecimiento y la producción del cultivo (Vázquez *et al.*, 2007).

3.5.4 Sequía socioeconómica.

López, (1995) define a la sequía socioeconómica como “déficit inusual que genera impactos adversos en la sociedad que la padece, alterando el normal desenvolvimiento de su vida colectiva”. Este tipo de sequia se diferencia de los demás tipos sequias porque refleja la relación entre oferta y demanda de mercancías básicas, como lo son el agua o la energía hidroeléctrica, que dependen de las precipitaciones (OMM, 2006). La oferta oscila anualmente en función de la precipitación o de la disponibilidad de agua. La demanda fluctúa de igual manera y suele tender al alza debido, entre otros factores, al aumento de la población o al desarrollo (OMM, 2006).

3.5 Modelado de nicho ecológico

Antes de definir el modelado de nicho ecológico, se dará una definición de nicho. Illoldi & Escalante, (2008) refieren que el nicho ecológico engloba a todos los factores abióticos y bióticos con los cuales el organismo tiene una interacción en un espacio y tiempo determinado. El concepto general de nicho puede ser acotado a lo que se define como nicho ecológico, en donde hace alusión al tiempo actual en el cual se desarrolla el organismo, y cómo éste interacciona con los factores ambientales que influyen en él.

El diagrama de BAM ilustra la relación, en la cual un área de distribución se relaciona con los factores que influyen en él, más que el simple nicho fundamental de la especie (Soberón & Peterson, 2005), ilustrado en la figura 1, el cual es una representación abstracta del espacio geográfico (**G**)

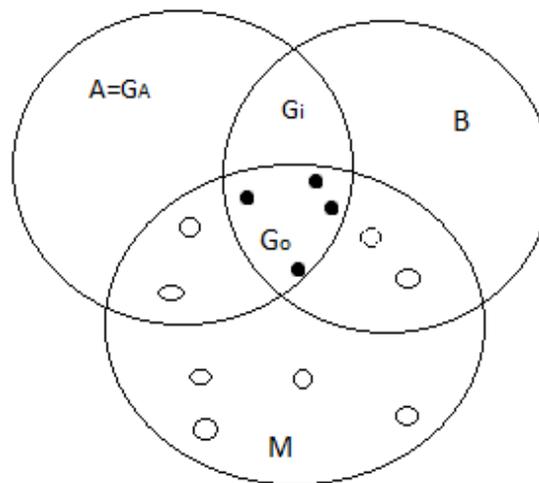


Figura 6. Diagrama BAM, describe interacciones entre factores bióticos (B), abióticos (A) y de movimiento (M)

A = variables scenopoéticas; B = variables bióticas; M = área accesible; Go = área ocupada; Gi= área que no puede ser invadida.

Las variables A (las scenopoéticas) son aquellas que no interactúan de forma directa con la especie (variables ambientales) (Soberón, 2007). La región del mundo con el mundo biótico, lo representa la letra B, conveniente para el

desarrollo de la especie, el área accesible (M) es aquella que la especie ha explorado (Soberón & Peterson, 2005). El área de G_0 es el lugar del mundo en donde las condiciones bióticas y ambientales que son favorables y que ha sido explorada por la especie (Soberón & Nakamura, 2009).

Los modelos de nichos ecológicos se clasifican con base a los algoritmos que utilizan, siendo estos: estadísticos de regresión, de funciones envolventes, de distancia, de entropía máxima y de algoritmos genéticos (Elith & Leathwick, 2009). Múltiples estudios han utilizado los SIG para la realización de asociaciones de especies huésped-vector, para la identificación de las fuentes de infestación y el seguimiento de los patrones después de la aplicación de un control químico. (Peterson *et al.*, 2012; Porcasi *et al.*, 2006). Los programas como Maxent, DivaGis y NicheA mediante información ambiental disponible de sitios donde se tienen ocurrencias de la especie.

3.7 Literatura citada

Adelabu S., O. Mutanga M. and Cho, (2012). A review of remote sensing of insect defoliation and its implications for the detection and mapping of *Imbrasia belina* defoliation of Mopane Woodland. *The African Journal of Plant Science Biotechnology* 6(1): 1-13.

Batista, D. R. P. (2016). Algunas Consideraciones Sobre El Comportamiento De La Sequía Agrícola En La Agricultura De Cuba Y El Uso De Imágenes Por Satélites En Su Evaluación. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 22–41. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4591.3843>

Bergaoui, M. and A. Alouini. (2001). Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* 12: 205-213.

Carnier, L. (1986). "Decline in Quebec's forests; Assessment of the situation". Service de la Recherche Appliquée. *Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec*. 1-12

- Carper, JW, Lillesand, TM y Kiefer, RW. (1990). El uso de transformaciones de intensidad-tono-saturación para fusionar datos de imágenes SPOT pancromáticas y multiespectrales. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 56 (4): 459 - 467.
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I., & Burgeño, J. (2015). Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledeteccion*, 43, 31–42. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.3683>
- Chuvieco S. (1996). Fundamentos de Teledetección espacial. Madrid. *Ediciones RIALP*. 568 pp.
- Ciesla W. (2000). Remote monitoring in forest health protection. *USDA Forest Service*.
- Collins, J.B. & Woodcock, C.E.(1994). Change detection using the Gram-Schmidt transformation applied to mapping forest mortality. *Rem. Sens. Env.* 50: 267-279.
- Coulson R., Stephen, F. (2008). Impacts of insects in forest landscapes: Implications for forest health management. In: Pain T. (Ed.) *Invasive Forest Insects, Introduced Forest Trees, and Altered Ecosystems*. Springer, pp. 101-125.
- Cryan, J. R., Svenson, G. J. (2010). Family-level relationships of the spittlebugs and froghoppers (Hemiptera: *Cicadomorpha: Cercopoidea*). *Systematic Entomology.*, 35, 393-415.
- Donker N.H.W & N.J. Mulder (1976). Analysis of MSS digital imagery with the aid of principal component transform. ISP Commission VII.
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697, doi:

10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.

Franklin, S.E. & raske, A.G.(1994). Satellite remote sensing of spruce budworm forest defoliation in Western Newfoundland. *Can. J. Rem. Sens.* 20: 37-48

Franklin, S.E.; WAring, R.H.; McCreight, R.W., Chen, W.B. & Fiorella, M. (1995). Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest. *Can. J. Rem. Sens.* 21: 299-308.

Gilabert, M. A., J. González & J. García (1997). "Acerca de Los Índices de Vegetación." *Revista de Teledetección*. N° 8 (May 2014):11.

Granados, D., & López, G. F. (2001). "Disponible En: <http://Www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?Id=62970102>." *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 7 (1):5–13.

Hansen MC., Stehman SV., Potapov PV. (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:8650–8655.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E., Gao, X. & Ferreira, L. (2002). Descripción general del desempeño radiométrico y biofísico de los índices de vegetación MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2), 195-213. doi:

Hunt, E.R., Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, no.30:43-54.

Illoldi, P., & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3(January 2008), 7–12.

Lobato, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 197–211. http://www.ame-web.org/images/stories/Congresos/31-Sevilla-2010/5A_Delpino.pdf

- Magrama, (2010). Inventario UE-ECE de daños forestales (IDF) en España. Red Europea de Seguimiento de daños en los bosques. Nivel I. Resultados Anuales de los muestreos. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España*. http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventariocartografia/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_nivel_I_resultados.aspx (acceso en: noviembre de 2019).
- Manion P. and Griffin D. 2001. Large landscape scale analysis of tree death in the Adirondack Park, New York. *Forest Science* 47: 542–549. DOI <https://doi.org/10.1093/forestscience/47.4.542>
- Marcos V., O (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (26),59-80. (fecha de Consulta 25 de noviembre de 2020]) ISSN: 0213-4691. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=176/17602604>
- Masek J., Goward S., Kennedy R., Cohen W., Moisen G., Schleeweis K., Huang C.(2013). United States forest disturbance trends observed using Landsat time series. *Ecosystems* 16:1087- 1104.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22
- Muñoz, (2013). “Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación.” *Centro de Información de Recursos Naturales* 15.
- Nallely, S., Belmont, M., Javier, V., Padilla, A., & Pérez, R. (2019). Caracterización y control de la caída foliar en pinos de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56), 174–195.
- OMM. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía. In Organización Meteorológica Mundial (Ed.), Información meteorologica y climatica para el

desarrollo agrícola sostenible. (1st ed., Vol. 1006).
https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_es_2006.pdf

Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R., Martínez, E., Nakamura, M. (2011). Ecological niches and geographic distributions: monographs in population biology. *Princeton: Princeton University Press*.

Radeloff, V.C.; Mladenoff, D.J. & Boyce, M.S. (1999). Detecting Jack Pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: separating effects from determinants. *Remote Sens. Environ.* 69:156-169.

SEMARNAT (2003). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales 2002. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Shettigara, V.K. (1992). Una técnica de sustitución de componentes generalizada para la mejora espacial de imágenes multiespectrales utilizando un conjunto de datos de mayor resolución. *Ingeniería fotogramétrica y teledetección*, 58 (5): 561 - 567.

Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10, 1115–1123, doi: 10.1111 / j.1461-0248.2007.01107.x.

Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas : concepts , methods , and assumptions. *PNAS*, 1, 1–7, doi: 10.1073 / pnas.0901637106.

Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of model of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10, doi: 10.17161/bi.v2i0.4.

Solberg S., Eklundh L., Gjertsen A., Johansson T., Joyce S., Lange H (2007). Testing remote sensing techniques for monitoring large scale insect defoliation. Conferencia Interacional ForestSat 2007 on *Hyperspectral &*

Advanced sensors, Montpellier (France), November, 5 pp.

Tu, T. M. (2004). Una técnica de fusión rápida de intensidad-tono-saturación con ajuste espectral para imágenes IKONOS. *Transacciones IEEE sobre geociencia y teledetección*, 1 (4): 309 - 312.

Trujillo T., Navarro C. Analysis of Site-dependent *Pinus halepensis* Mill. Defoliation Caused by 'Candidatus *Phytoplasma pini*' through Shape Selection in Landsat Time Series. *Remote Sens. Environ.* 2019. 11, 2-17.

Valiente, M. (2001). Sequía : definiciones , tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80.

Vázquez, M. R. J.; Fernández, A.; Solano, O. O.; Lapinel, P. B. y Rodríguez, F (2007) "Mapa de aridez de Cuba". *Zonas Áridas*, vol.1, pp. 101-109.

Xu, J. L., Hugelier, S., Zhu, H., & Gowen, A. A. (2021). Deep learning for classification of time series spectral images using combined multi-temporal and spectral features. *Analytica Chimica Acta*, 1143, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.11.018>

4. Análisis de la variación espacio temporal del bosque de pino afectado por el salivazo *Ocoaxo cardonai* en dos microcuencas del Rio Tecolutla

4.1 Resumen

Ocoaxo cardonai Castro (Hemiptera: *Cercopidae*) conocido como el “salivazo del pino” ocasionó el amarillamiento y la caída prematura de las acículas en miles de hectáreas de bosque de pino en la Sierra Norte de Puebla, en los años 2011 y 2017. Por ello, en el presente estudio se analizó la dinámica de la vegetación en dos microcuencas (A y B), en la Sierra Norte de Puebla, para el periodo 2000-2019, utilizando datos de series temporales de NDVI y de variables climáticas, con el propósito de detectar y cuantificar las áreas afectadas por el “salivazo del pino”. Las series de tiempo de los NDVI y de las variables climáticas se extrajeron de la plataforma Landsat y Terraclimate. Sus tendencias se calcularon mediante el estadístico Mann Kendall y Theil-Sen y sus puntos fueron evaluados por el estadístico de Pettit, con un $\alpha=0.05$. Los resultados muestran tendencias mínimas (0.004), medias (0.061) y el NDVI (0.0004); y decrecientes para la precipitación (-0.0252) y humedad del suelo (-0.0341), con una significancia al 95 %. Mediante la prueba Pettitt se identificaron los puntos de cambio dentro de la serie NDVI, siendo los periodos 2010 a 2014 y 2016 a 2019 con disminuciones en los valores del NDVI viéndose afectados por el salivazo del pino. El análisis de cambios de la vegetación periodo 2010-2019 mostró disminuciones en el NDVI a nivel de píxel viéndose afectado 1747.94 ha dañadas por *Ocoaxo cardonai*. Las afectaciones se corroboraron mediante polígonos de monitoreo realizados en las áreas de estudio, mostrando la precisión del estimador en la detección de cambios en la vegetación.

Palabras claves: Plagas forestales, Monitoreo, NDVI, Teledetección.

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Luis Ángel Cruz González. Director: Dr. David Cibrián Tovar

4.2 Abstract

The spittle bug *Ocoaxo cardonai* Castro (Hemiptera: *Cercopidae*) made yellowing and premature shedding of needles in thousands of hectares of pine forest, in the Sierra Norte de Puebla, in 2011 and 2017. Therefore, this study analyzed the vegetation dynamics in two micro-watersheds (A and B), in the Sierra Norte de Puebla. The time series data of NDVI and climatic variables were used to identify and quantify the areas affected by "pine salivation" for the period 2000-2019. The time series of NDVI and climatic variables were extracted from the Landsat and Terraclimate platform. Their trends were calculated using the Mann Kendall and Theil-Sen statistic and their points were evaluated by Pettit's statistic, with an $\alpha=0.05$. The results show increasing trends for maximum (0.001), minimum (0.004), mean (0.061) and NDVI (0.0004) temperatures; and decreasing trends for precipitation (-0.0252) and soil moisture (-0.0341), with a significance at 95 %. Using the Pettitt test, the points of change within the NDVI series were identified, being the periods 2010 to 2014 and 2016 to 2019 with decreases in NDVI values being affected by the pine spittle bug. The analysis of vegetation changes period 2010-2019 revealed decreases in NDVI at the pixel level being affected 1747.94. The affectations were corroborated by monitoring polygons carried out in the study areas, showing the accuracy of the estimator in detecting changes in vegetation.

Key words: Forest pests, Monitoring, NDVI, Remote sensing.

Thesis Master's Degree in Master of Science in Forestry Sciences, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Luis Ángel Cruz González. Advisor:

4.3 Introducción

Introducción

En los últimos años, el estudio de la dinámica de la vegetación ha tomado mucha relevancia para explorar la respuesta de la vegetación a diversos impactos que provoca el cambio climático. Los impactos del clima en los procesos de los ecosistemas regionales pueden demostrarse mediante la respuesta de la vegetación a la característica climática con la aplicación de la Teledetección Satelital (TS). De igual manera, el monitoreo de grandes áreas se lleva a cabo mediante la TS al ser una herramienta eficaz, y su costo de utilización es menor que la observación humana directa (Wang *et al.*, 2020).

Uno de los índices espectrales más usados para evaluar las respuestas ecológicas frente a cambios ambientales es el “Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada” (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI tiene un gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Paruelo 2008). Además, éste tiene una gran importancia de carácter ecológico (Alcaraz *et al.*, 2008) y se encuentra altamente correlacionado con la cobertura vegetal y el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés); cuanto más alto es su valor mayor es el LAI, así como la cobertura vegetal (Jiang *et al.*, 2015). Es por esto que han sido estudiadas las concordancias entre los factores climáticos y el Índice de Diferencia Normalizada, a diferentes escalas espacio-temporales (Wang *et al.*, 2003).

La TS en conjunto con el índice diferencial de vegetación normalizado se ha utilizado para el seguimiento de perturbaciones y cuantificación de daños por plagas forestales. Por lo que, este índice permite monitorear el estado de salud de la vegetación de la superficie terrestre (Tucker *et al.*, 1985, Zhao, 2003; citado por Jiang *et al.*, 2015), ya que las plagas forestales ocasionan daños de tipo mecánico o fisiológico a los árboles, como deformaciones, disminuciones en el crecimiento, debilitamiento o incluso la muerte, causando impactos ecológico,

económico y social (Leautaud y López 2017). Así por ejemplo, Spruce *et al.* (2011) utilizaron el NDVI para identificar y dar seguimiento a las infestaciones por el defoliador *Lymantria dispar*, en el norte de los Estados Unidos. De manera semejante, Schrader *et al.* (2016) utilizaron datos fenológicos registrados con MODIS NDVI para estimar daños causados por los descortezadores *Dendroctonus ponderosae* Hopkins, en *Pinus contorta* Douglas ex Loudon y *Dendroctonus rufipennis* Kirby, en *Picea engelmanni* Parry ex Engelmann, en Colorado, Estados Unidos. También, Gomez *et al.* (2020) utilizaron sensores remotos para detectar infestaciones por el descortezador *Dendroctonus frontalis* Zimmerman en el sureste de Estados Unidos.

En México, en el 2011, en la Sierra Norte de Puebla, se presentaron los primeros reportes de amarillamiento de las acículas de los pinos y su caída prematura. En un inicio, el agente causal fue atribuido a hongos del follaje del género *Lophodermium* sp. (Pichardo *et al.* 2017). Luego, se demostró que el principal agente fue el salivazo del pino (*Ocoaxo cardonai* Castro) (Castro-Valderrama *et al.*, 2018), ya que las ninfas de estos insectos se alimentan de la savia de las raíces de los pinos y los adultos de las acículas, lo que ocasiona el cambio de color y su caída prematura y en casos más graves, la muerte.

Considerando que los cambios de color de las acículas y su posterior caída prematura en los rodales de los pinos quedaron registrados en las imágenes de satélite, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo:

4.4 Objetivo

Examinar la dinámica de la vegetación en dos microcuencas (A y B), en la Sierra Norte de Puebla, para el periodo 2000-2019, utilizando datos de series temporales de NDVI y de variables climáticas, con el propósito de detectar y cuantificar las áreas afectadas por la plaga *Ocoaxo cardonai* Castro, conocida como el “salivazo del pino”.

4.5 Materiales y métodos

4.5.1 Descripción del área de estudio

La zona de estudio se dividió en dos microcuencas, ubicada entre los municipios de Tetela de Ocampo y Aquixtla, entre las coordenadas: -97.85° , -97.76° y 19.85° , 19.73° ; 97.8° , -97.66° y 19.89° , 19.74° , (Figura 1), con una superficie de 21,229 ha. Dichas microcuencas forman parte de la cuenca del Río Tecolutla de la Región Hidrológico-Administrativa X Golfo Centro y la Región Hidrológica 27 Norte de Veracruz Tuxpan-Nautla (CONAGUA, 2015). Se encuentran en la parte alta de la Sierra Madre Oriental, los cauces se alojan en cañones angostos y profundos con fuertes pendientes. El clima es templado-húmedo con abundantes lluvias en verano y todo el año (Tapia y Silva, 2017). La temperatura media fluctúa entre 14°C y 26°C ; la precipitación entre 1200 mm y 4000 mm y la evaporación entre 1064 mm y 1420 mm, con vegetación de bosques de pino, pino encino y otras asociaciones.

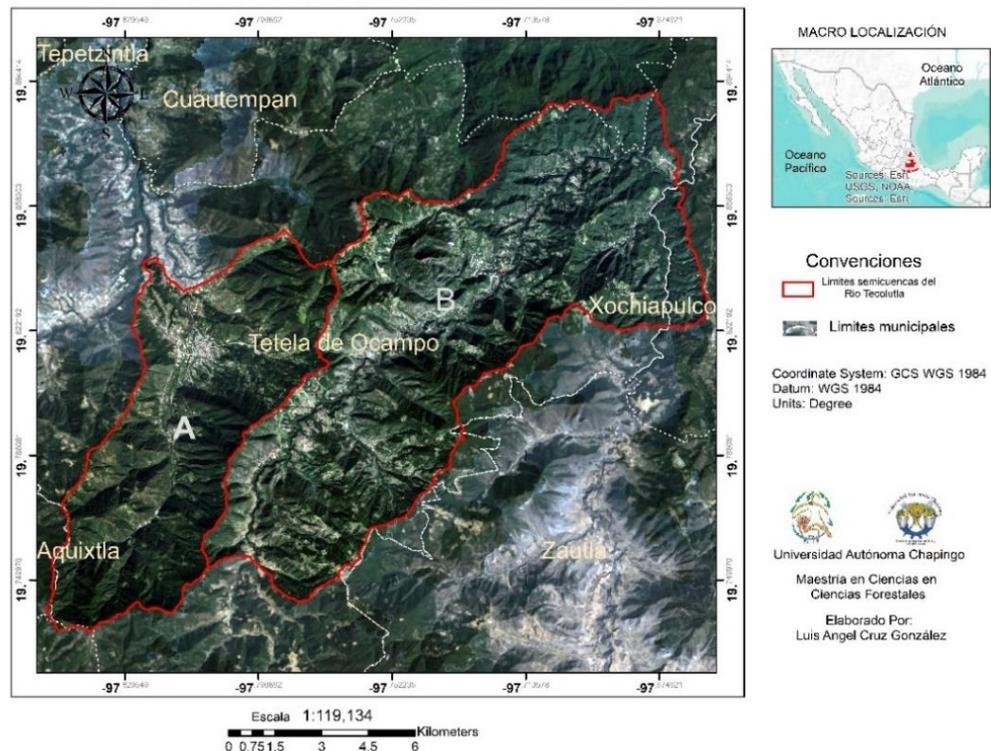


Figura 7. Localización del área de estudio

4.5.2 Obtención de los datos para la elaboración de series de tiempo

Las series temporales inter-anales para las variables temperatura máxima (T-max), temperatura mínima (T-min), temperatura media (T-med), precipitación, y humedad del suelo fueron extraídas de imágenes satelitales mensuales de la plataforma TerraCimate, con una resolución espacial de ~4 km (1/24 grado), para el período 2000-2019 (Abatzoglou *et al.*, 2018), con el propósito de explorar la relación de sus tendencias con la dinámica del desarrollo de la plaga del salivazo del pino, a través del NDVI. Las series de tiempo inter-mensuales e inter-anales del NDVI (en formato raster) se extrajeron de imágenes de satélite Landsat Tm/ETM, con una resolución espacial de 30 m.

Todas las series de tiempo fueron procesadas mediante la aplicación web Google Earth Engine ®; herramienta que permite procesar y analizar datos geoespaciales en la nube, dando imágenes corregidas atmosféricamente y permitiendo el enmascaramiento de nubes.

4.5.3 Análisis estadístico

Para la determinación de las tendencias a escala mensual de las series de tiempo de las variables climáticas y del NDVI, se utilizó la prueba no paramétrica Estacional de Mann-Kendall, MK, propuesta por Hirsch *et al.*, 1982, que es una modificación a la prueba de Mann (1945) y Kendall (1962), y que detecta cambios en la media de los datos y no asume independencia entre ellos, resultando útil para datos que presenten una componente estacional, como son generalmente los datos climatológicos. En esta prueba se consideró como hipótesis nula, H_0 : No hay tendencia en la serie (estable en media) y como hipótesis alternativa, H_1 : existe tendencia en la serie, con un nivel de confianza del 95%. Posteriormente, para determinar el incremento o la disminución por unidad de tiempo de la serie, se utilizó la prueba no paramétrica de Theil-Sen, T-Sen (Sen, 1968), que es la pendiente media de una regresión lineal, y que fue modificada por Yue y Wang (2004), con un enfoque de corrección de la varianza en series con correlación. Estas dos pruebas no paramétricas se han utilizados para analizar tendencias

temporales por su mayor robustez ante el incumplimiento de los supuestos necesarios en los métodos paramétricos tradicionales (Sen, 1968; Mann, 1945 y Kendall 1962) y su descripción puede ser consultada en Cannarozzo *et al.* (2006). La estimación de las tendencias se realizó mediante el paquete “Modifiedmk” de R, considerando un p-valor menor o igual al 0.05.

En cuanto a la identificación de los puntos de cambio en la media los valores de las series de tiempo del NDVI, ésta se realizó mediante la prueba no paramétrica de rangos de Pettitt (Ayuso, 2017). En esta prueba se consideró como hipótesis nula, H_0 : No existe cambio y como hipótesis alternativa, H_1 : Existe cambio, con un nivel de confianza del 95%. Este estadístico se expresa como $X_d = 2 \sum_{i=1}^d ri - d(n + 1)$ para $d = 1, 2, \dots, n$, en el cual la variación se detecta en el valor del año m cumple $X_m = \max_{1 \leq d \leq n} |X_d|$ es un punto de quiebre fuerte dentro de la serie de tiempo.

Las tendencias del NDVI, a escala de píxel, se determinaron mediante el estimador T-Sen (Sen, 1968) modificada por Yue y Wang (2004), a partir de una sucesión de imágenes internuales, extraídas de la plataforma Landsat TM/ETM, con una resolución espacial 30 m. Su procesamiento, manipulación y cálculos se realizaron con el programa estadístico R, el software Qgis 3.10 y la aplicación web Google Earth Engine ®.

4.5.4 Zonas de monitoreo y validación

El monitoreo e identificación del salivazo del pino, Ocoaxo Cardonai en Sierra Norte de Puebla, fue llevado a cabo mediante el proyecto “plan integral estatal de Contingencia fitosanitaria para el combate de los principales actores que deterioran a las coníferas de Puebla”; trabajando en conjunto Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con la Unión Agroforestal de Puebla A.C. (UNIÓN) y la colaboración de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Mediante la realización de brigadas terrestres, se identificaron puntos importantes de afectación donde la vegetación de pino mostraba tonos rojizos- amarillentos y/o

decaimiento de las acículas; y una vez localizados, se delimitaron en polígonos siendo las áreas más afectadas en cuanto a extensión de la afectación por Ocoaxo Cardonai.

4.6 Resultados

4.6.1 Tendencias y Puntos de cambio de las series de tiempo de los NDVI y de los factores climáticos.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de las pruebas MK y T-Sen, las tendencias de las series temporales NDVI medio, T-min, T-med, y T-max fueron positivas, revelando un incremento en sus valores medios a través del tiempo, para el periodo 2010-2019 (Figura 1 y 2). En contraste, las variables precipitación y humedad de suelo mostraron tendencias negativas, para el mismo período de análisis, dejando ver una disminución en sus valores (Figura 1 y 2). Con la información del Cuadro 1, se puede observar que las tendencias de las variables del NDVI y climatológicas fueron estadísticamente significativas ($p \leq 0.5$), excepto para T-max.

Cuadro 1. Tendencias del NDVI, SPI y variables climatológicas utilizando el estimador de Theil-sen y prueba de MK en las microcuencas de estudio

Microcuencas	Series	Sen's slope	Kendall's tau
A	NDVI	0.0002**	0.2862**
	T-Med	0.0025**	0.0612**
	T-Max	0.0012*	0.0230*
	T-Min	0.0047**	0.1044**
	Precip	-0.024 **	-0.0311**
	SPI	0.0051 ^{np}	0.0827 ^{np}
	Humedad suelo	-0.0318*	-0.0687*
B	NDVI	0.0002**	0.3130**
	T-Med	0.0061**	0.0611**
	T-Max	0.0011 ^{np}	0.0205 ^{np}
	T-Min	0.005**	0.1046**
	Precip	-0.028*	-0.0337*
	SPI	0.005 ^{np}	0.0827 ^{np}

NDVI: índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, T-med: Temperatura Media, T-Max: Temperatura Máxima, T-Min: Temperatura Mínima p-Valores: NP No significativo, *significativo, ** altamente significativo

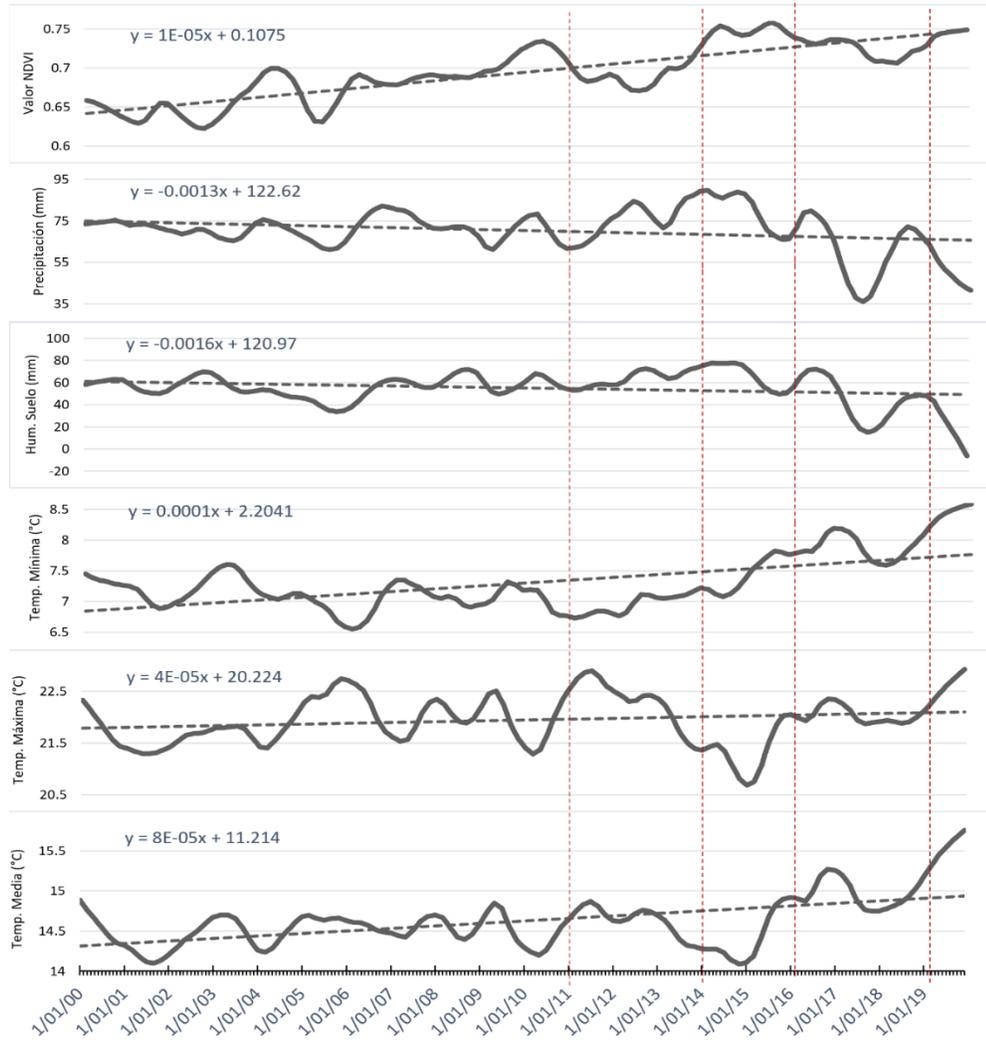


Figura 2. Tendencias de las series de tiempo mensual 1. NDVI, 2. Precipitación 3. Humedad del suelo, 4. Temperatura Mínima, 5. Temperatura Máxima y 6. Temperatura Media; y puntos de cambio en el componente tendencia de la serie NDVI ($p < 0.05$), en la microcuenca A, para el periodo de tiempo 2000-2019.

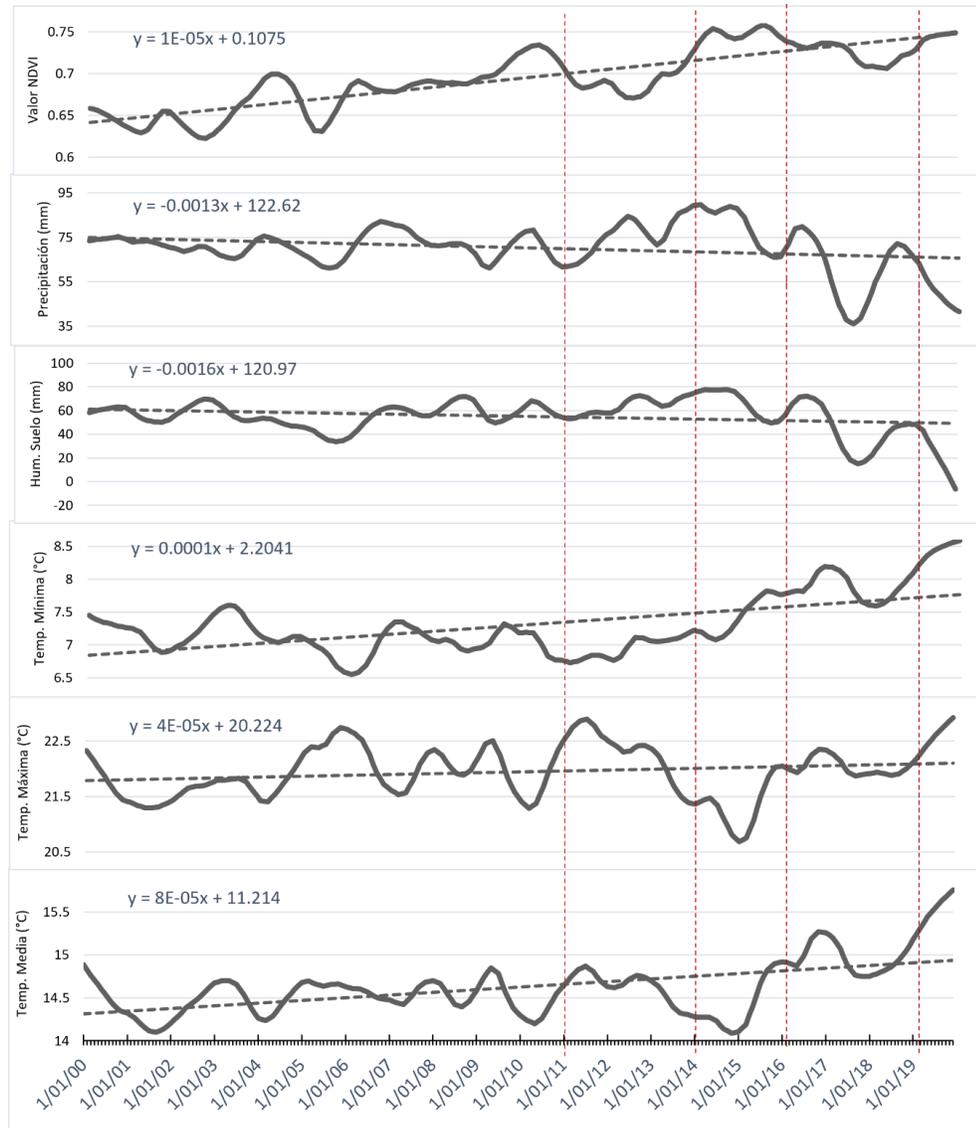


Figura 3. Tendencias de las series de tiempo mensual 1. NDVI, 2. Precipitación 3. Humedad del suelo, 4. Temperatura Mínima, 5. Temperatura Máxima, y 6. Temperatura Media; y puntos de cambio en el componente tendencia de la serie NDVI ($p < 0.05$), en la microcuenca B, para el periodo de tiempo 2000-2019.

Debido a que las tendencias del NDVI y de las variables ambientales: precipitación, humedad del suelo, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media fueron similares, en ambas microcuencas, se realizaron sus

análisis de tendencias y puntos de cambio como una única área de estudio, para el mismo periodo de tiempo.

Cuadro 2. Tendencias del NDVI, SPI y variables climatológicas utilizando el estimador de Theil-Sen y prueba de MK en la cuenca de estudio.

	Series	Sen's slope	Kendall's tau
Microcuenca	NDVI	0.0004**	0.309**
	T-Med	0.061**	0.002**
	T-Max	0.001np	0.022np
	T-Min	0.004**	0.104**
	Precip	-0.0252*	-0.031*
	Humedad suelo	-0.0341*	-0.073*

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, T-med: Temperatura Media, T-Max: Temperatura Máxima, T-Min: Temperatura Mínima p-Valores: NP No significativo, *significativo, ** altamente significativo

Las series de tiempo NDVI-medio, temperatura mínima y temperatura máxima mostraron una tendencia ascendente en sus valores mensuales a lo largo del periodo de estudio (Cuadro 2 y Figura 4), de igual manera como las tendencias de la microcuencas por separado. En el Cuadro 2, se puede observar que las tendencias de las variables T-min, T-med, precipitación, humedad de suelo y NDVI fueron estadísticamente significativas ($p \leq 0.5$), excepto T-max.

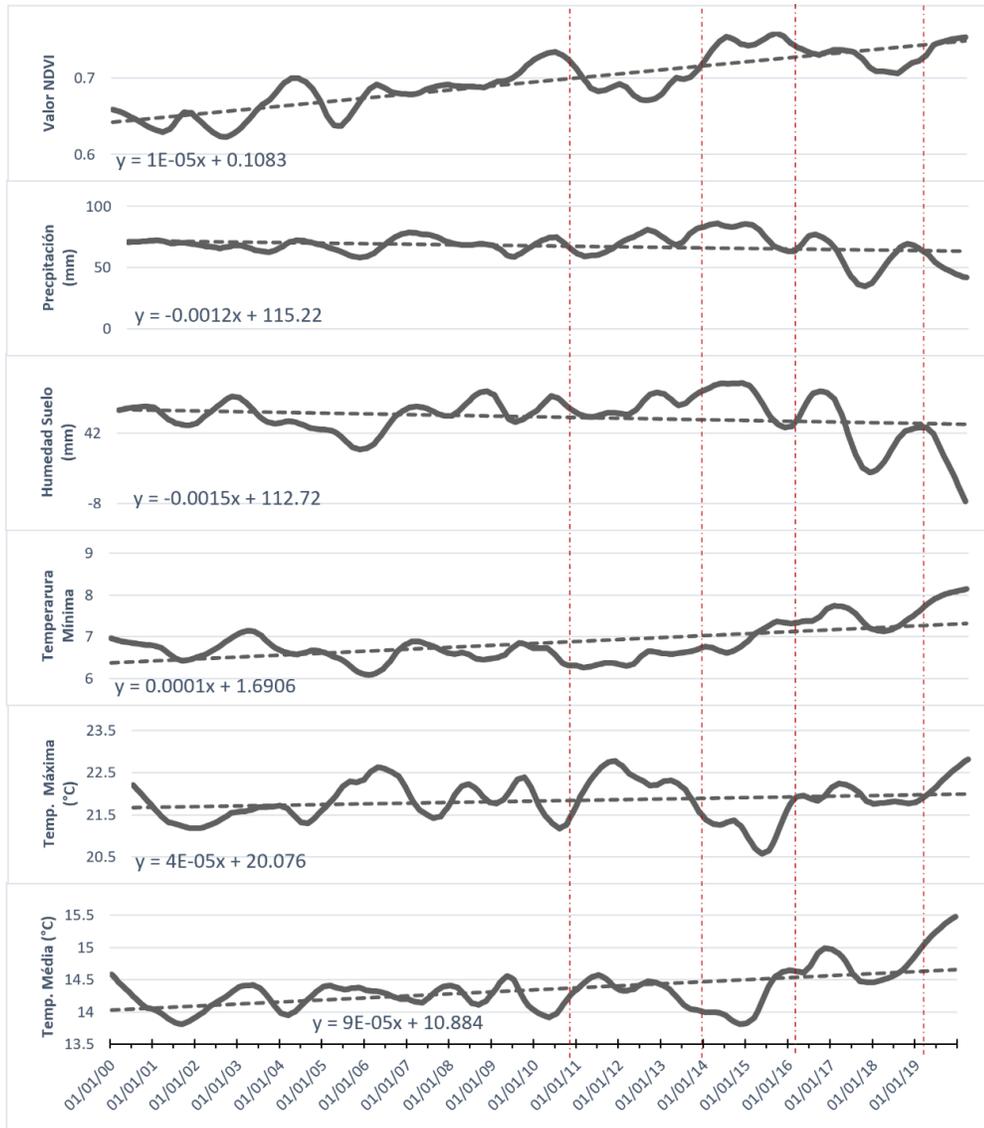


Figura 4. Tendencias de las series de tiempo mensuales 1. NDVI, 2. Precipitación 3. Humedad del suelo, 4. Temperatura Mínima, 5. Temperatura Máxima 6. Y Temperatura Media; y puntos de cambio en el componente tendencia de la serie NDVI ($p < 0.05$), en la microcuenca, para el periodo de tiempo 2000-2019.

Mediante la prueba Pettitt, la tendencia de la serie NDVI mostró puntos de cambio estadísticamente significativos (< 0.05), durante los períodos del 2010 al 2014 y del 2016 al 2018 (Figura 2.1). En estos dos períodos, los valores del índice de vegetación normalizada sufrieron una disminución considerable en su tendencia, al verse afectada la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación, lo cual generó una disminución en la cobertura y el índice de

área foliar de la vegetación del pino, en la microcuenca de estudio (Jiang *et al.*, 2015). De acuerdo con Pichardo, *et al.* (2017), el primer reporte de afectación fisiológica en los pinos de la Sierra Norte fue en el 2011, donde las acículas de estos sufrieron un amarillamiento temprano y su posterior defoliación, siendo atribuido a hongos de follaje *Lophodermium* sp. Posteriormente, se demostró que dicha afectación fue generada por *Ocoaxo cardonai* Castro, conocido como el salivazo del pino (Castro *et al.*, 2018). En particular, durante el periodo 2014 a 2016, el aumento de las precipitaciones y la tendencia creciente de las temperaturas, favoreciendo la tasa de supervivencia del agente causal que ocasiona la caída foliar, en etapa de ninfa, al mostrarse las condiciones apropiadas de humedad en el suelo y temperatura (Figura 4). Lo anterior, se debe a que el suelo de la microcuenca es poco compacto y con alto contenido de materia orgánica, lo que genera una buena retención de humedad. En etapa adulta, el salivazo se dirige al follaje para alimentarse, inyectando saliva y sustancias que degradan el tejido vegetal, cuyos daños persisten al abandonar su hospedero, provocando ese cambio en la coloración y defoliación en los árboles, en casos más graves la muerte (Castro *et al.*, 2017). Durante 2017 y 2018, se llevaron a cabo inspecciones terrestres dentro de las zonas de monitoreo y validación, establecidas en la cuenca de estudio, y se encontró que el amarillamiento del punto de cambio del período 2016 al 2018 se debió al salivazo del pino.

4.6.4 Patrones espaciales de las tendencias en la vegetación afectadas por el *Ocoaxo cardonai*

El comportamiento de la variabilidad de la tendencia del NDVI medio-interanuales, para el periodo 2010-2019, fue heterogéneo (Figura 3), siendo analizados 189,160 píxeles. Para categorizar las tendencias calculadas por medio de la pendiente de T-Sen se utilizó la clasificación implementada por Jiang *et al.* (2015), donde los valores que se encuentren entre 0.005 y -0.005 son considerados estables, dado que no existen estrictamente píxeles en cero; es

decir al no haber cambios en la vegetación y áreas sin vegetación; valores mayores a 0.005 son con clasificadas como pixeles con una mejora en el NDVI; es decir que hubo un aumento en el área foliar de la vegetación; y valores menores a -0.005 son clasificados como pixeles con áreas degradadas; es decir que el área foliar de la vegetación disminuyó severamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis espacial, el 75.37 % (13067.72 ha) de los pixeles de la microcuenca, mostraron áreas estables (color gris), sin cambios perceptibles en el NDVI, eso significa que no hubo cambios en el área foliar de la vegetación propiciados por el salivazo, para el período de estudio. El 13.42% de los pixeles dentro de la cuenca mostró un decremento del NDVI-medio, clasificado entre valores menores a -0.005 (color rojo en el mapa), siendo el 10.26 % de los decrementos en vegetación arbórea equivalente a 1747.94 ha lo que significa que la vegetación sufrió una disminución causada por el salivazo del pino, *Ocoaxo cardonai Castro*. Estas disminuciones coincidieron con los monitoreos de áreas afectadas en el 2017 y 2018, verificando la precisión de este estimador en la identificación de la vegetación afectada por el *Ocoaxo cardonai Castro*, identificado como causal de la defoliación de los pinos en las microcuencas de estudio.

Finalmente, el 12.97 % de la microcuenca de estudio (color verde) equivalente a 2208.73 ha mostraron tendencias positivas mayores a 0.005 según la clasificación establecida, lo que significa que su área foliar aumento.

Cabe mencionar que las tendencias espaciales del NDVI fueron estadísticamente significativas, con un p-valor ≥ 0.05 .

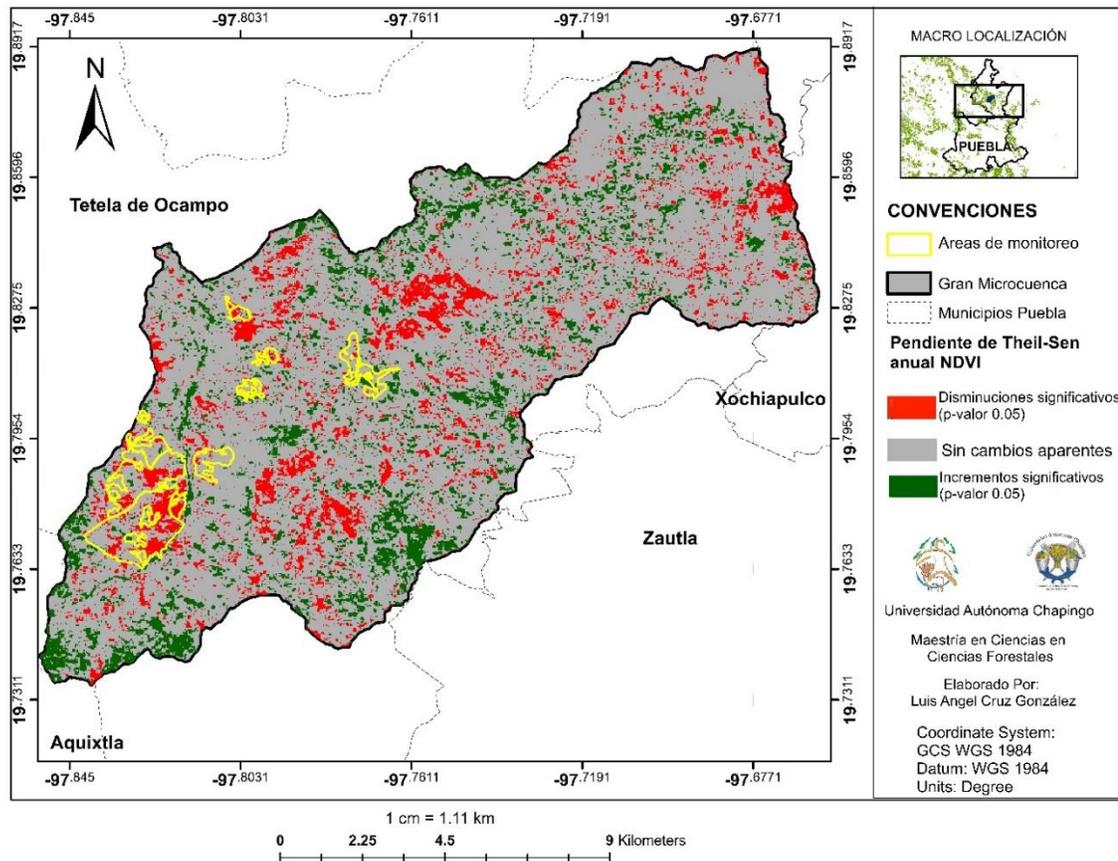


Figura 3. Distribución espacial de las tendencias NDVI para el periodo 2010-2019.

4.8 Conclusión

Las tendencias encontradas entre las series de tiempo mensuales de las variables en ambas microcuencas por medio de la prueba de Theil-Sen fueron similares, por lo cual se recurrió a un análisis general del área estudiada. El NDVI, temperaturas máximas, temperaturas mínimas y temperaturas máximas mostraron una tendencia ascendente al contrario de la humedad del suelo y precipitación que mostraron una pendiente negativa. Los puntos de cambio calculados por medio de la prueba Pettitt, mostraron periodos de disminución en los valores medios del NDVI, en los años 2010 a 2014 y 2017 a 2019; periodos señalados como afectados por el insecto defoliador *Ocoaxo cardonai* Castro al disminuir el área foliar de la vegetación de pino. Los cambios espaciales en la

vegetación para el periodo 2010-2019 a nivel de píxel mediante la prueba de Theil-Sen, revelaron áreas con disminuciones en la vegetación de bosque siendo a 1747.94 ha afectadas por el defoliador de los pinos.

4.9 Literatura citada

Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A., Hegewisch, K.C., 2018. TerraClimate, a High-Resolution Global Dataset of Monthly Climate and Climatic Water Balance from 1958–2015. *Sci. Data* 5 (1), 1–12.

Alcaraz, D., Baldi, G., Durante, P., & Garbulsky, M. F. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Análisis de La Dinámica Temporal Del NDVI En Áreas Protegidas: Tres Casos de Estudio a Distintas Escalas Espaciales, Temporales y de Gestión*, 17(3), 108–117. <https://doi.org/10.7818/re.2014.17-3.00>

Ayuso, J.L. (2017). Análisis de series temporales de datos ambientales: Detección de tendencias/cambios. Universidad de Córdoba.

Campo, A., Gartzia, A., García-González, R., & Marinas, A. (2002). *Relaciones Entre El Índice Espectral De Vegetación Ndvi Y La Cobertura Vegetal En Pastos De Puerto Del Pirineo Occidental*. 304–310.

Cannarozzo, M.; Noto, L.V. & Viola, F. (2006) Spatial distribution of rainfall trends in Sicily (1921-2000). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31(18), 1201-1211.

Castro, V. U. (2017). Familia Cercopidae. En: Cibrián T., D. (Ed.). *Fundamentos de Entomología Forestal*. (pp: 239-241). Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.

Cibrián, T. D. Barrera, R. U. M., Pérez V., O. A., Quiñónez, F. S. A., 77 Uribe, G. F. V., & Lara, B. A. (2016). *Plan de contingencia fitosanitaria Forestal en varios municipios del estado de Puebla: Proyecto de Investigación Informe*

Final.

- CONAGUA, C. N. del A. (2015). Atlas del agua en México 2015. *In Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (Vol. 1, p. 131).
- Gomez, D. F., Ritger, H. M. W, Pearce, C., Eickwort, J., & Hulcr, J. (2020). Ability of remote sensing systems to detect bark beetle spots in the southeastern US. *Forests*, 11(11), 1–10. <https://doi.org/10.3390/f11111167>
- Hirsch, R.M., Slack, J.R. and Smith, R.A., Techniques for trend assessment for monthly water quality data, *Water Resources Research.*, 18, pp. 107-121, 1982.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013 . Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie V. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017 . Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2019 . Conjunto de datos vectoriales Climatología. Escala 1:250000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Cao, R., Zhang, Y., & Shen, W. (2015). Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 51, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.031>
- Kendall, M.G., Rank correlation methods. 3 ed. Ed. Hafner Publishing Company. New York, 1962
- Leautaud, P., & López, J. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geográficas*, 92, 1–

12. <https://doi.org/10.14350/rig.50249>

Mann, H.B., Non-parametric tests against trend, *Econometrika*, 13, pp. 245–259, 1945.

Meddens, A. J. H., Hicke, J. A., Vierling, L. A., & Hudak, A. T. (2013). Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 132, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.002>

Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.

Pichardo S., L. A., Pérez M., R., Ramírez H., L., Arriola P., V. J., & Ramírez G., A. G. (2017). Caracterización de zonas afectadas por el agente causal de la caída foliar de pino en Puebla, México. *Agroproductividad*, 10(8), 35–41.

Schrader, P. C., Grulke, N. E., & Dressen, M. E. (2016). Characterizing forest insect outbreak in colorado by using modis ndvi phenology data and aerial detection survey data. USDA Forest Service - General Technical Report PNW-GTR, 2016(940E), 1–35.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American statistical Association*, 63(324): 1379. <doi:10.2307/2285891>

Spruce, J. P., Sader, S., Ryan, R. E., Smoot, J., Kuper, P., Ross, K., Prados, D., Russell, J., Gasser, G., McKellip, R., & Hargrove, W. (2011). Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.013>

Spruce, J. P., Hicke, J. A., Hargrove, W. W., Grulke, N. E., & Meddens, A. J. H. (2019). Use of MODIS NDVI products to map tree mortality levels in forests affected by mountain pine beetle outbreaks. *Forests*, 10(9).

<https://doi.org/10.3390/f10090811>

Wan, J., Qi, G. Jun, M. J., Ren, Y., Wang, R., y McKirdy, S. (2020). Predicting the potential geographic distribution of *Bactrocera bryoniae* and *Bactrocera neohumeralis* (Diptera: Tephritidae) in China using MaxEnt ecological niche modeling. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), 2072–2082. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62840-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62840-6)

Wang, B., Xu, G., Li, P., Li, Z., Zhang, Y., Cheng, Y., Jia, L., & Zhang, J. (2020). Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China. *Ecological Indicators*, 108(June 2019), 105719. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105719>

Yue, S. and Wang, C. Y. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 18(3): 201–218. <doi:10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>

5. MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA POTENCIAL DE *Ocoaxo cardonai* Castro UTILIZANDO VARIABLES CLIMÁTICAS Y TOPOGRÁFICAS

5.1 Resumen

La estadística en conjunto con los Sistemas de Información geográfica (SIG) han sido utilizados para la comprensión de diversos fenómenos ecológicos para la toma de decisiones en el manejo de la biodiversidad. Por ello, en el presente trabajo tiene como fin determinar la distribución geográfica potencial de *Ocoaxo cardonai* Castro mediante el modelado de nicho ecológico para la identificación de sus regiones ambientalmente adecuadas. Para el modelado de nicho ecológico se implementaron ocurrencias de la especie de *Ocoaxo cardonai* y la utilización de 21 variables de BioClim, con la utilización del algoritmo basado en la Máxima Entropía (MaxEnt). Se realizaron 100 réplicas de los modelos generados y se seleccionó como el mejor modelo (AUC) el que representa la mediana. Para la validación se tomaron los polígonos de monitoreo de la especie de estudio de los años 2017 y 2018 en la Sierra Norte de Puebla. Para determinar las variables que contribuían más en la generación de los modelos se utilizó la prueba Jackknife. El mejor modelo seleccionado fue aquel con un AUC = 0.9961. Se seleccionaron ocho variables, las que mejor explicaran la presencia de *Ocoaxo cardonai* Castro, siendo la de mayor contribución: el rango medio diurno con 26.30 % seguido de la elevación con 21.34%, según la prueba Jackknife. La distribución potencial que mostró la especie de estudio fue en regiones montañosas del centro y este de México, áreas donde se distribuyen de manera sus hospederos. El 87 % de la superficie monitoreada se encuentran dentro de las áreas de distribución potencialmente alta y el restante 12 % en áreas de distribución nula, mostrando la precisión del modelado.

Palabras clave: Modelado, distribución potencia, SIG, MaxEnt

5.2 Abstract

Statistics in conjunction with Geographic Information Systems (GIS) have been used for the understanding ecological phenomena for decision making in biodiversity management. Therefore, the present work aims to determine the potential geographic distribution of *Ocoaxo cardonai* Castro by means of ecological niche modeling for identification of its environmentally suitable regions. For the ecological niche modeling, occurrences of the *Ocoaxo cardonai* species and the analyzed 21 BioClim variables, with the use of the Maximum Entropy based algorithm (MaxEnt). One hundred replicates of the generated models were carried out and the best model (AUC) was selected as the one that represents the median. For validation, the monitoring polygons of the study species from the years 2017 and 2018 in the Sierra Norte de Puebla were taken. To determine the variables that contributed most in the generation of the models, the Jackknife test was used. The best model selected was the one with an AUC = 0.9961. Eight variables were selected, the ones that best explained the presence of *Ocoaxo cardonai*, being the one with the highest contribution: the mean diurnal range with 26.30 % followed by elevation with 21.34%, according to the Jackknife test. The potential distribution shown by the study species was in mountainous regions of central and eastern Mexico, areas where its hosts are widely distributed. Eighty-seven percent of the monitored area is within the areas of potentially high distribution and the remaining 12% in areas of null distribution, showing the accuracy of the modeling.

Keywords: Modeling, power distribution, GIS, MaxEnt

Thesis Master's Degree in , Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Luis Ángel Cruz González . Advisor:

5.3 Introducción

Las plagas forestales son agentes que ocasionan daños de tipo mecánico o fisiológico a los árboles, como deformaciones, disminuciones en el crecimiento, debilitamiento o incluso la muerte, causando un impacto ecológico, económico y social importante (Leautaud & López 2017).

Las diferentes técnicas estadísticas en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG) son utilizados en la ecología para la obtención de interpretaciones en la toma de decisiones en el manejo de la biodiversidad, cuya utilización se centran en la predicción y diagnóstico de diversos fenómenos (Yáñez *et al.*, 2016). Peterson *et al.*, (2002) mencionan que múltiples estudios han utilizado los SIG para la realización de asociaciones de especies huésped-vector, así mismo múltiples autores, como por ejemplo (Porcasi *et al.* 2006) han utilizado los SIG para la identificación de las fuentes de infestación y el seguimiento de los patrones después de la aplicación de un control químico.

Para el conocimiento de los patrones de distribución son obtenidos a partir de áreas estimadas mediante trabajo en campo y colecciones, a lo que llamamos datos puntuales. Sin embargo, estas áreas podrían estar subestimadas; es por esta razón que los datos colectados se utilizan para la obtención de modelos de nichos ecológicos, además que permite usar la distribución potencial para la determinación de sus patrones biogeográficos (Illoldi & Escalante, 2008).

En los últimos años, la Sierra Norte de Puebla ha sufrido una serie de cambios en las poblaciones del género *Pinus*, cambio que se atribuyó al incremento en la población del salvazo del pino (*Ocoaxo cardonai*), cuya afectación ocasiona la caída prematura de las acículas de los pinos, y en casos más graves, la muerte. Los estudios de la distribución del salvazo del pino son escasos o casi nulos en México al ser una especie de relativamente reciente descubrimiento.

5.4 Objetivo

Determinar la distribución geográfica potencial del *Ocoaxo cardonai* Castro mediante el modelado de nicho ecológico para la identificación de regiones ambientalmente adecuadas.

5.5 Materiales y métodos

5.5.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio se dividió en dos microcuencas, localizadas en de las coordenadas: -97.852536 O, -97.767729 E y 19.851534 N, 19.734687 S; -97.807333 O, -97.661020 E y 19.891163 N, 19.743701 S, de la proyección WGS84 (Figura 1); abarcan una superficie de 21,229 ha, formando parte de los municipios de Tetela de Ocampo y Aquixtla. Estas microcuencas forman parte de la cuenca del Rio Tecolutla de la Región Hidrológico-Administrativa X Golfo Centro y la Región Hidrológica 27 Norte de Veracruz Tuxpan-Nautla (CONAGUA,2015). Se encuentran en la parte alta de la Sierra Madre Oriental, los cauces se alojan en cañones angostos y profundos con fuertes pendientes. El clima es templado-húmedo con abundantes lluvias en verano y todo el año (INEGI,2019). La temperatura media fluctúa entre 14°C y 26°C; la precipitación entre 1200 mm y 4000 mm y la evaporación entre 1064 mm y 1420 mm, con vegetación de bosques de pino, pino encino y otras asociaciones (INEGI, 2017)

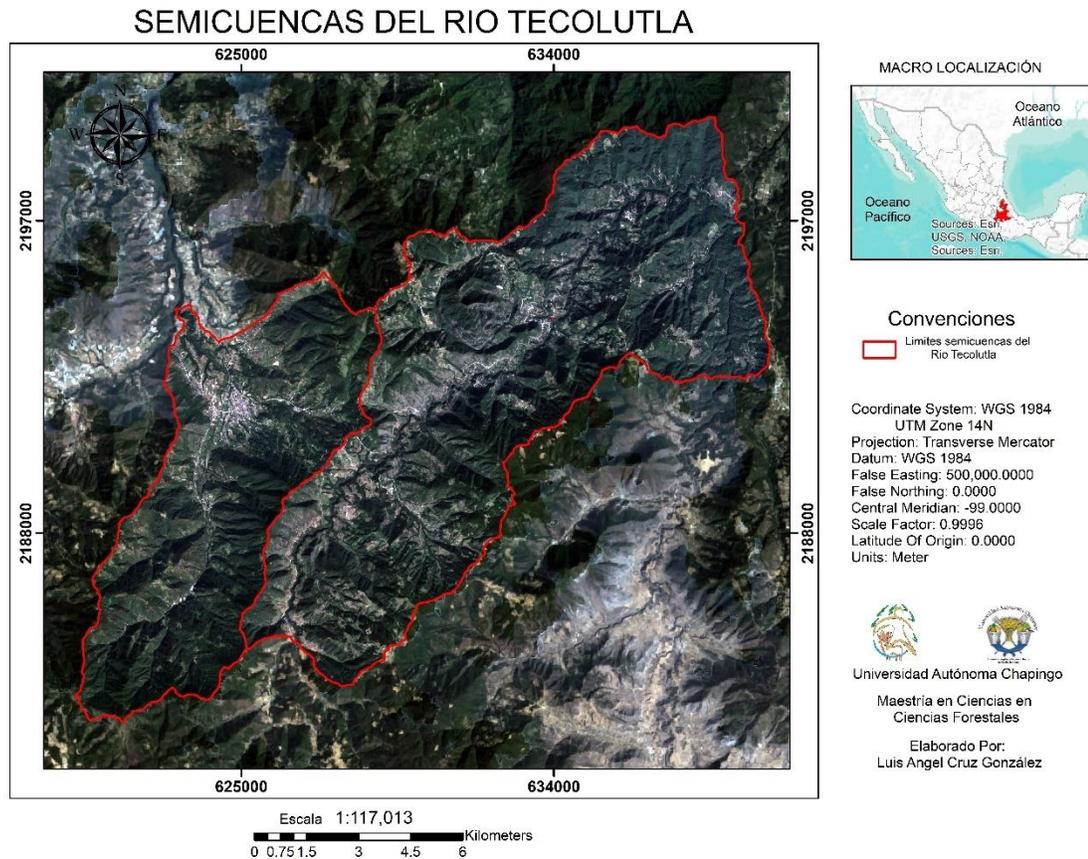


Figura 8. Microcuencas del Río Tecolutla

5.5.2 Obtención de los datos de ocurrencia

Broennimann *et al.*, (2012) y Guisan & Zimmermann, (2000) mencionan que con la implementación de datos de ocurrencia de la especie (s), mediante la modelación de nichos ecológicos, empleando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se puede obtener el área de distribución potencial de una especie.

Los registros de ocurrencia de la especie a modelar, *Ocoaxo cardonai* se obtuvieron del repositorio *Global Biodiversity Information Facility (GBIF)* que incluyen datos de herbarios y colecciones de insectos de todo el mundo, de igual manera se consultó el sitio *inaturalist* para complementar los datos de ocurrencia y extracción de datos de material recolectado de *Ocoaxo cardonai* Castro del artículo de Castro *et al.*, (2018).

Una vez obtenidos los datos de las bases de datos, estos fueron depurados de registros duplicados, aquellos que no pertenecían a la especie y los datos que no se encontraban en la República Mexicana.

5.5.3 Variables ambientales

Para modelar la distribución potencial de *Ocoaxo cardonai* se utilizaron 21 variables. Diecinueve variables bioclimáticas provenientes de los datos de precipitación y temperatura anuales y mensuales, que fueron generadas por el proyecto WordClim (Hijmans *et al.*, 2005): BIO1 = Temperatura media anual, BIO2 = rango medio diurno (media mensual (temp. Max. - temp. Min.)), BIO3 = Isotermalidad (BIO2 / BIO7) ($\times 100$), BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$), BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido, BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío, BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6), BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo, BIO9 = Temperatura media del cuarto más seco, BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido, BIO11 = Temperatura media del cuarto más frío, BIO12 = Precipitación anual, BIO13 = Precipitación del mes más húmedo, BIO14 = Precipitación del mes más seco, BIO15 = Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación), BIO16 = Precipitación del cuarto más húmedo, BIO17 = Precipitación del cuarto más seco, BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido, BIO19 = Precipitación del cuarto más frío. Por último, se incluyeron las capas de altitud y de orientación obtenidas a partir del modelo de elevación proporcionado por el mismo portal. Todas las imágenes se encuentran en formato ráster con una resolución espacial de 30 segundos de arco = 0.93 km.

5.5.4 Modelado de nicho ecológico.

Para el análisis de la distribución potencial del *Ocoaxo cardonai* se utilizó la versión de escritorio 3.4.4 del algoritmo de Máxima Entropía (MAXENT [Phillips *et al.*, 2006]). El algoritmo empleado utiliza una técnica de aprendizaje de máquina para la elección de los mejores modelos a partir de los datos disponibles (Phillips *et al.*, 2006). Debido a que se ha demostrado en diversos estudios con

simulaciones que se obtiene buenas predicciones aun cuando la cantidad de muestras sean reducidas (<10) (Phillips *et al.*, 2006; Pearson *et al.*, 2007), se empleó este programa.

El recorte y la conversión de formato ráster a ASC fue llevado a cabo en el programa QGIS 3.10.9 (QGIS.org, 2021). La selección de capas se efectuó conforme al coeficiente de correlación de Pearson para la reducción de colienalidad entre las variables, eligiendo aquellas con una $r < 0.8$. Entre las variables altamente correlacionadas se seleccionaron aquellas que tuvieran una relación más directa con las especies en estudio (Fitzpatrick *et al.*, 2013). A su vez, para evitar problemas de sobre-modelación, las observaciones de presencia se filtraron para dejar un solo registro por píxel 30 s de arco (0.93 km) esto realizado con Qgis 3.10.9 (QGIS.org, 2021).

En la modelación con el algoritmo de MaxEnt, se mantuvieron los parámetros que venían predeterminados, como lo sugiere (Phillips & Dudik, 2008), con una excepción, fueron desactivados los parámetros *Extrapolate* y *Do clamping*, como lo sugieren (Elith *et al.*, 2011) para evitar extrapolaciones artificiales en los extremos de los valores de las biovariables de estudio.

El resultado a obtener es de tipo logístico, aplicando un umbral de mínima presencia de entrenamiento, donde se implementaron 100 réplicas para el modelo utilizando como método de remuestreo Bootstrap. Se incluyeron todos los puntos para el modelado ya que se obtuvieron pocos registros (Martínez *et al.*, 2016). Se elaboraron histogramas de frecuencias con los valores del AUC (Area Under the Curve) resultantes de las 100 repeticiones verificar la normalidad de los resultados y así poder elegir el mejor con base a una medida de tendencia central (Plasencia *et al.*, 2014).

La verificación de la capacidad predictiva de los modelos, se utilizó la prueba estadística AUC que parte de la curva ROC (Receiver Operating Characteristics) (Hanley & McNeil, 1982). Prueba que genera un valor que va de 0.5 a 1; 0.5

significa una clasificación al azar, mientras que un valor de 1 indica un ajuste perfecto (Yáñez *et al.*, 2016).

Para la manipulación o la edición del modelo y poder usarlo como un instrumento para la gestión del territorio, fue necesario ingresar los archivos en formato “bill” generados en Maxent (Phillips *et al.*, 2004) a un software para el procesamiento geográfico, en este caso QGIS (QGIS.org, 2021).

5.5.5 Validación

La validación se realizó mediante los polígonos de monitoreos de daño que fueron reportados durante el plan de contingencia en la Sierra Norte de Puebla durante los años 2017 y 2018. Al ser una especie relativamente nueva en cuanto a descubrimiento, solo se cuentan con esos polígonos de monitoreo

5.6 Resultados y discusiones

En las diferentes bases de datos consultadas para la obtención de datos de ocurrencia, se extrajeron 1018 datos de registros pertenecientes al género *Ocoaxo Fennah*, (1968), de los cuales 980 se situaban en otro país, carecían de información o no pertenecían a la especie de interés. El filtro por género se implementó al no aparecer dentro de los resultados la especie de interés, fue en la base de datos descargados donde se pudo extraer las ocurrencias de *Ocoaxo cardonai*. Los registros restantes, solo 2 correspondieron a la especie de estudio, de los cuales 2 fueron eliminados ya que se localizaban en la misma celda de las capas utilizadas durante el modelado, los cuales se muestran en la Figura 8. Por lo que se cuenta con solo 18 observaciones puntuales de la especie de estudio; sin embargo (Pearson *et al.*, 2007) destacan que MaxEnt se considera adecuado para la predicción de zonas de presencia para especies con las que se cuentan con pocos registros.

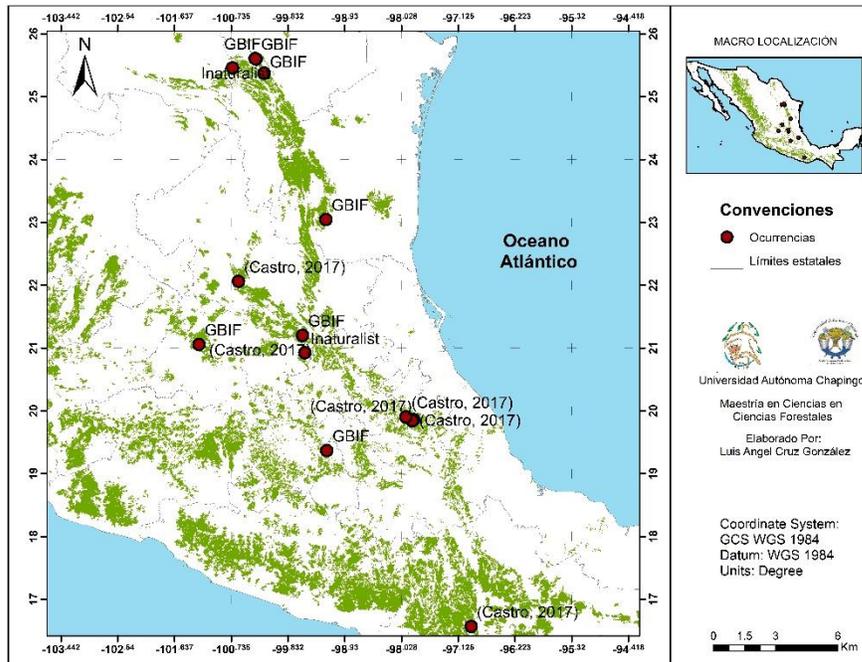


Figura 9. Registro de ocurrencia de *Ocoaxo cardonai*

Marmion *et al.*, (2009) mencionan que los modelos predictivos de distribución de especies resultan muy útiles y de bajo costo a la hora de querer realizar planificación y /o manejo de la biodiversidad en regiones con escasa información de estudio. Que, en este caso, es conocer la distribución potencial de la especie de *Ocoaxo* para la detección temprana de otra infestación en su área de distribución. Para la generación de modelos útiles y precisos, los investigadores deben tener un conocimiento de las limitaciones e incertidumbres en los modelos de distribución de especies (Marmion *et al.*, 2009). Así mismo menciona que con el modelo empleado se pueden obtener buenos resultados y es considerado como robusto (Marmion *et al.*, 2009). De igual manera, (Yáñez-Cajo *et al.*, 2016) plantean que el modelo de regresión logístico ha demostrado ser el que más se apega a la realidad para la predicción de distribución de especies.

Plasencia *et al.*, (2014) señalan que la variación de las réplicas de los modelos, de acuerdo con los valores del AUC, resulta ser una herramienta adecuada para la elección de los mejores modelos, para ver la tendencia entre las réplicas y así poder determinar la tendencia de los modelos en función del tipo de distribución

que sigan. El histograma de frecuencias con los valores AUC de las 100 réplicas se observó que se distribuía de forma normal, corroborado con la prueba de Shapiro–Wilk ($W = 0.98444$, p -valor = 0.283). Seleccionado como mejor modelo el que presentó un valor de (AUC = 0.9961), el cual representa a la mediana, esto para reducir el efecto de los valores extremos (Plasencia *et al.*, 2014).

La no utilización de las herramientas *do clamping* y *extrapolate* para evitar extrapolaciones artificiales (Elith *et al.*, 2011), esto porque la especie estudiada, como se ha visto en campo, tiene como hospedero principalmente al género *Pinus sp.*, seguido del género *Quercus sp.* (Cid *et al.*, 2019), los cuales tienen como distribución regiones montañosas en México. Por lo cual la elección de las variables apropiadas es un punto muy importante en la modelación, ya que se podría presentar cierto sesgo por desconocimiento del tema de estudio o de la biología de la especie (Yáñez *et al.*, 2016).

Estudios reportan que la abundancia en algunas especies de salivazo coincide con la época lluviosa (en México la época calurosa coincide con las lluvias); es decir, el periodo de detección del insecto coincide con los meses más lluviosos del año y desaparece en los más secos y el *Ocoaxo cardonai* presenta esos comportamientos (Castro *et al.*, 2019; Cid *et al.*, 2019). Fue punto de partida para la elección de biovariables que mostraran periodos cálidos y húmedos, de aquellos que tenían una correlación alta con estas variables. De igual manera, la elevación es uno de los factores más importantes que influyen en la distribución de especies vegetales y animales, el cual ha tomado mucha relevancia en diversos estudios a estos patrones altitudinales de la diversidad (Rahbek, 2005) y de gran relevancia para este trabajo, como se puede ver en el Cuadro 2 columna i, donde el porcentaje de contribución para el modelado de distribución potencial de la especie *Ocoaxo cardonai*; siendo la elevación (Elev.) la segunda variable de importancia, antecedida por el rango medio diurno (bio2) con un porcentajes de contribución de 21.3485 % y 26.3064 % respectivamente; las variables con la menor contribución fue estacionalidad de la temperatura

(desviación estándar *100) (blo4) con 2.0513 %, y precipitación del mes más húmedo (Bio13) con 1.8278%.

La prueba de Jacknife (cuadro 2, columna j1 y j2) muestra el grado de contribución las biovariables al modelo, cuando son utilizadas de forma aislada y las variables que aumentan la ganancia cuando son omitidas del modelo. La variable Rango anual de temperatura (Bio 7) muestra una mayor ganancia al modelo cuando es usada de forma aislada, por lo que pareciera tener información más útil por sí misma, sin embargo, la variable por sí sola no aportan suficiente ganancia a la construcción al modelo, por lo cual es necesaria la interacción las demás. La variable ambiental que disminuye más la ganancia cuando se omite es la temperatura media del cuarto más seco (Bio 9), que por lo tanto parece tener la mayor información que no está presente en las otras variables; caso contrario la variable precipitación del mes más húmedo (Bio 13) aumenta ligeramente la ganancia cuando se omite del modelo.

Cuadro 3. Porcentaje de contribución de las biovariables al modelo de nicho ecológico

Variable	i) % de contribución	j) Prueba Jacknife	
		j.1	j.2
Bio 2	26.3064	0.7787	3.3341
Elev.	21.3485	0.6107	3.3638
Bio 17	14.6619	0.7799	3.3317
Bio 7	11.8278	1.0311	3.3432
Bio 18	11.3374	0.3535	3.2649
Bio 9	10.6389	0.9592	3.2304
Bio 4	2.0513	0.4653	3.4058
Bio13	1.8278	0.378	3.3721

j) Prueba de Jacknife donde se muestra la importancia relativa de cada variable expresado en valores de ganancia; j.1 señala los valores cuando la variable ambiental es usada de forma aislada en el modelo, y j.2 cuando la variable es omitida del modelo. Elev. = Elevación, BIO2 = rango medio diurno (media mensual (temp. Max. - temp. Min.)), BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100), Bio7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6),

BIO9 = Temperatura media del cuarto más seco, Bio13 = Precipitación del mes más húmedo, Bio17 = Precipitación del cuarto más seco, Bio18 = Precipitación del trimestre más cálido.

La FIGURA 9 muestra el resultado del modelo de nicho con la distribución potencial del *Ocoaxo cardonai*, en donde se aprecia las regiones que van de no adecuado a alta idoneidad del hábitat. Como se muestra en el modelo, las regiones con alta idoneidad son más propensa a presentar infestaciones de esta especie de cercópido, siendo las regiones montañosas del centro y del este de México, puntualmente la parte de la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico Transversal, la Sierra Norte de Puebla y parte de la Sierra Norte de Oaxaca.

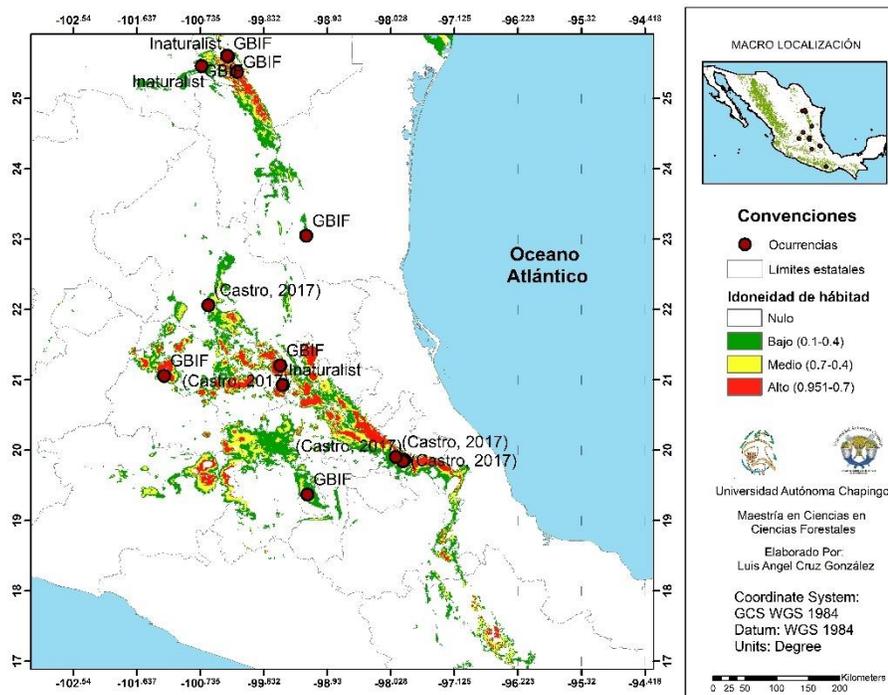


Figura 10. Distribución potencial de *Ocoaxo cardonai* en México

La distribución geográfica potencial del *Ocoaxo cardonai* en las microcuencas de estudio muestra un 61.8 % (9838.7 ha) de distribución potencial, con un nulo potencial 38.2 % (6085.7 ha) de la superficie total de las microcuencas. Cabe señalar que el 87 % de la superficie monitoreada se encuentran dentro de las

áreas de distribución potencialmente alta y el restante 12 % en áreas de distribución nula. Lo cual refleja el poder de detección de la distribución por medio del modelo empleado y no se puede descartar la probabilidad de que la especie pueda presentarse en áreas mostradas negativamente en la modelación (WAN *et al.*, 2020).

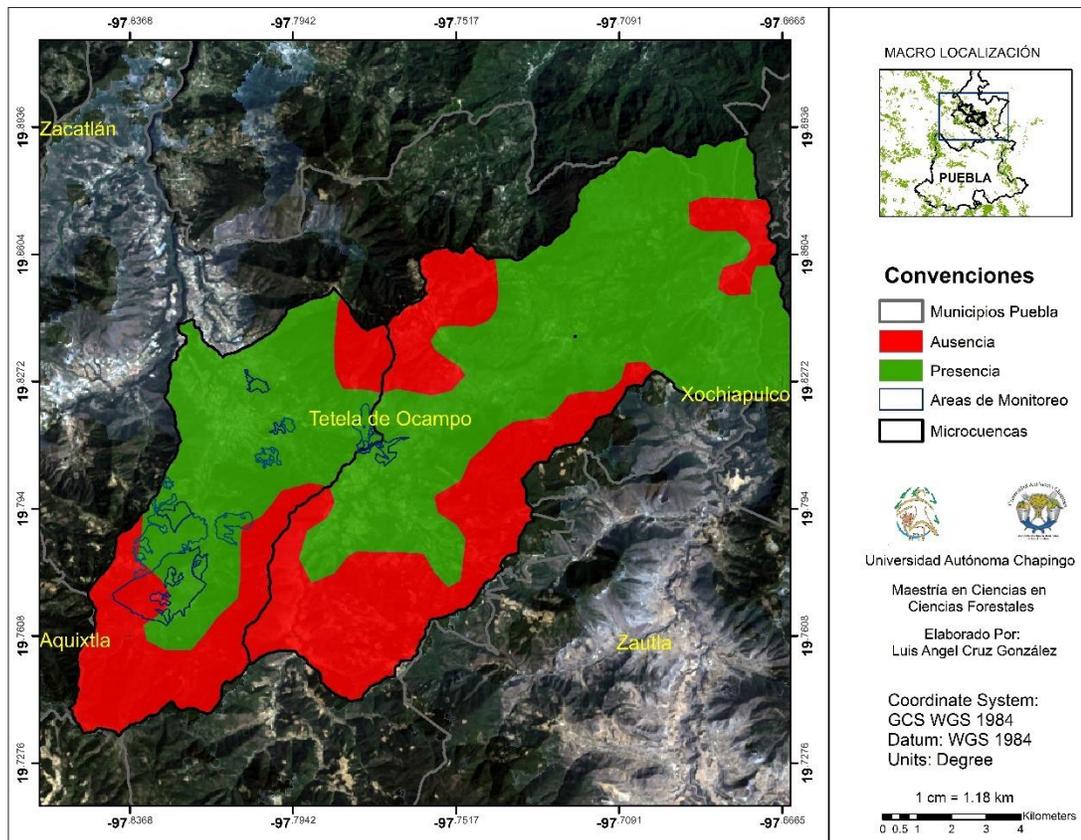
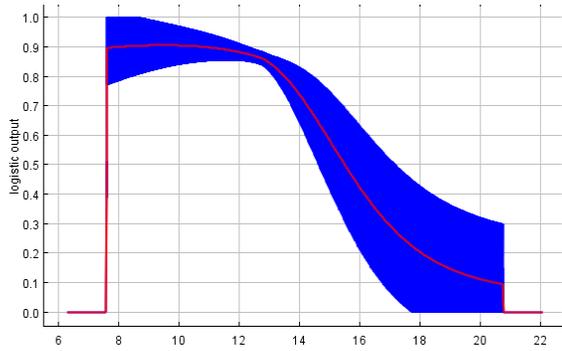


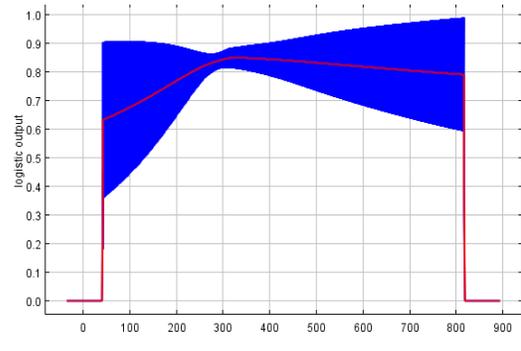
Figura 11. Distribución potencial *Ocoaxo cardonai* en las microcuencas de estudio.

La FIGURA 10 muestra las curvas de respuesta de las variables bio-ambientales para el modelado de la distribución geográfica del *Ocoaxo Cardonai* en el cual es más probable su distribución. Como se había dicho, el rango medio diurno de la temperatura (Bio 2) es la variable más importante de acuerdo con la prueba de Jackknife siendo su intervalo, en donde hay mayor probabilidad su distribución del *Ocoaxo cardonai* ($1 - 0.7$ según la regresión logística), el cual va de los 7°C a los

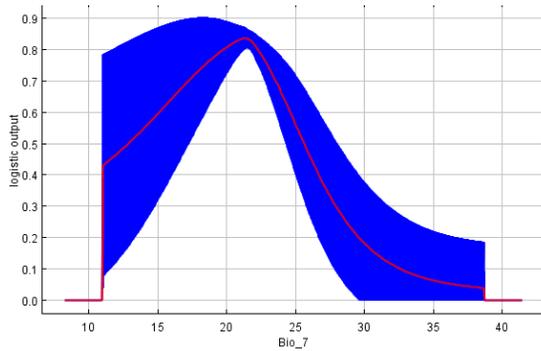
14 °C; seguido de elevación altitudinal, siendo su intervalo de distribución optimo altitudinal varía desde los 1100 msnm hasta los 2200 msnm.



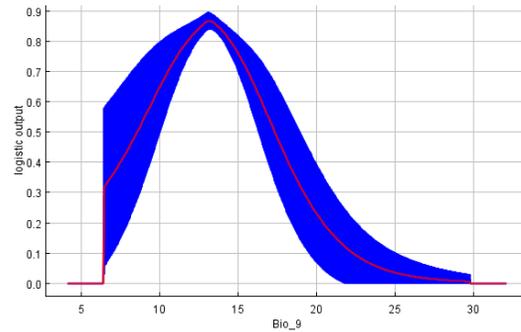
Rango medio diario (Bio 2)



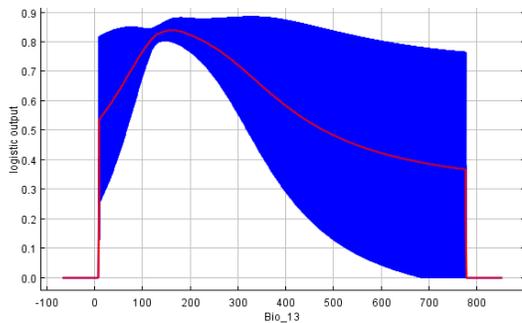
Estacionalidad de la temperatura (Bio 4)



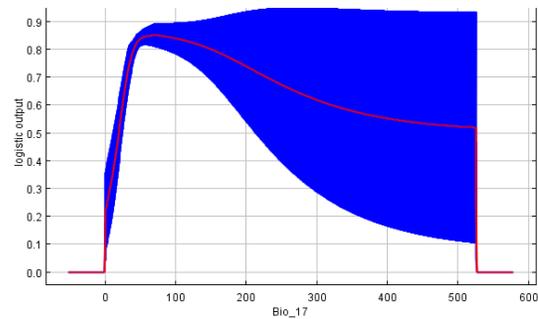
Rango anual de temperatura (Bio 7)



Temperatura media del cuarto más seco (Bio 9)



Precipitación del mes más húmedo (Bio 13)



Precipitación del cuarto más seco (Bio 17)

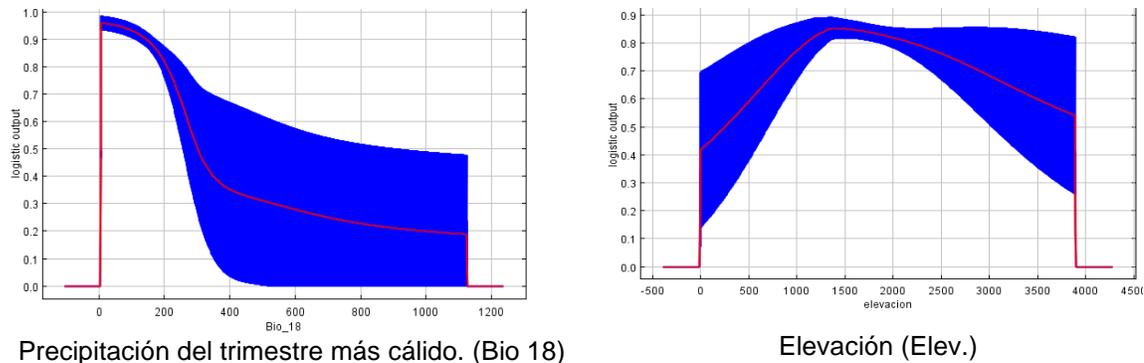


Figura 12. Curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas para generar los modelos de distribución geográfica potencial de *Ocoaxo cardonai*. Media de las 100 réplicas (rojo) +/- desviación estándar (azul).

5.7 Conclusiones

La modelación mostró un alto potencial de distribución en áreas montañosas de Guanajuato, Querétaro, Nuevo León, Coahuila, Puebla y una pequeña parte de Oaxaca en donde se encuentra la distribución natural de sus hospedantes, el género *Pinus sp.* con asociaciones de *Quercus sp.*: Contando con registros de monitoreo en áreas de afectación en la Sierra Norte de Puebla, situando más del 70 % de las ocurrencias dentro de la zona potencial y muy potencial de su distribución solo un 5 % se encontraban en zonas categorizadas como ausencia por el modelo, lo cual sugiere que es un buen modelo que predice su distribución a pesar de no contar con ausencias verdaderas, que es importante para una mejor evaluación del modelo. Así mismo con lo mostrado con la prueba de AUC representa un buen ajuste del modelo elegido para el entendimiento de la distribución potencial geográfica de la especie.

5.8 Literatura citada

Alcaraz, D., Baldi, G., Durante, P., & Garbulsky, M. F. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Análisis de La Dinámica Temporal Del NDVI En Áreas Protegidas: Tres Casos de Estudio a Distintas Escalas Espaciales, Temporales y de Gestión*, 17(3), 108–117. <https://doi.org/10.7818/re.2014.17-3.00>

- Campo, A., Gartzia, A., García-González, R., & Marinas, A. (2002). *Relaciones Entre El Índice Espectral De Vegetación Ndvi Y La Cobertura Vegetal En Pastos De Puerto Del Pirineo Occidental*. 304–310.
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I., & Burgeño, J. (2015). Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledeteccion*, 43, 31–42. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.3683>
- Illoldi, P., & Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*, 3(January 2008), 7–12.
- Jiang, W., Yuan, L., Wang, W., Cao, R., Zhang, Y., & Shen, W. (2015). Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 51, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.031>
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 362–371. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Plasencia, A. H., Escalona, G., & Esparza, L. G. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta Zoológica Mexicana (N.S.)*, 30(3), 471–490. <https://doi.org/10.21829/azm.2014.30372>
- WAN, J., QI, G. jun, MA, J., Ren, Y., WANG, R., & McKirdy, S. (2020). Predicting the potential geographic distribution of *Bactrocera bryoniae* and *Bactrocera neohumeralis* (Diptera: Tephritidae) in China using MaxEnt ecological niche modeling. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), 2072–2082. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62840-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62840-6)
- Wang, B., Xu, G., Li, P., Li, Z., Zhang, Y., Cheng, Y., Jia, L., & Zhang, J. (2020).

Vegetation dynamics and their relationships with climatic factors in the Qinling Mountains of China. *Ecological Indicators*, 108(June 2019), 105719. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105719>

Wang, H., Chen, A., Wang, Q., & He, B. (2015). Drought dynamics and impacts on vegetation in China from 1982 to 2011. *Ecological Engineering*, 75, 303–307. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.063>

Yáñez-Cajo, D., Moreno, M., Chaguamate, L., Valencia, N., & Rueda-ayala, V. (2016). *Aplicación de Modelos de Nicho Ecológico para estudios Epidemiológicos: Triatoma dimidiata , vector de la Enfermedad de Chagas en Ecuador Application of Ecological Niche Models for Epidemiologic studies : Triatoma dimidiata , vector of Chagas disease in. 37(1).*