

---

## Dinámica temporal de la actividad vegetal en zonas degradadas por *Ips confusus* en bosque de *Pinus cembroides*: región central de Chihuahua (2000-2014)

Juan Diego Maldonado Marín · Luis Carlos Alatorre Cejudo  
María Elena Torres Olave · Érick Sánchez Flores  
Alfredo Granados Olivas · Luis Carlos Bravo Peña

**E**n la actualidad son varios problemas que afectan a las regiones forestales de México, principalmente incendios, sequías, deforestación, plagas (Meneses, 2012), así como cambios en el régimen de las temperaturas máximas y mínimas, entre muchos otros (Alatorre *et al.*, 2014). En México existe una especie de pino que presenta la mayor distribución en todo el país, nombrado científicamente como *Pinus cembroides* y comúnmente conocido como pino piñón o pino piñonero. Se extiende tanto en la sierra Madre Oriental, con presencia en los estados de Coahuila, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro y San Luis Potosí, como en la sierra Madre Occidental, en las entidades de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas (Conafor, 2014).

Esta especie es de gran importancia ecológica, debido a que se desarrolla en laderas con pendientes abruptas, secas, rocosas, y al pie de las montañas. Tarda varios años en fructificar por primera vez, sin embargo, algunas de las ventajas es que evita la erosión de las laderas y permite la infiltración del agua, lo que ayuda al restablecimiento de los mantos acuíferos; además, es tolerante a las heladas, sequías y temperaturas ele-

vadas. Una desventaja es que es susceptible a daños por plagas y enfermedades (Conafor, 2014).

Desde años atrás *Pinus cembroides* ha presentado una grave problemática, ya que muestra procesos de degradación por distintos factores (Flores, Nájera, & Morales, 2003), por ejemplo, hongos y plagas de insectos raiceros, defoliadores, carpófagos, descortezadores y barrenadores (Mendoza, Cibrián, & García, 2011), que en cierta medida han comenzado a disminuir sus poblaciones. De manera específica, el descortezador *Ips confusus*, que se desarrolla de forma natural en los bosques de coníferas, es necesario para el funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, en respuesta a factores abióticos de estrés puede aumentar su densidad a niveles que alteran los procesos ecológicos de los bosques, en específico de *Pinus cembroides* (Ojeda, 2010). Las plagas tienen un efecto cíclico natural, ya que la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas e incendios forestales, factores que debilitan los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar *et al.*, 2013).

En la sierra Madre Occidental, se ha presentado el ataque de descortezadores en los bosques de pino piñonero en forma dispersa en el estado de Chihuahua, con presencia en distintos municipios. Desde 2012 la Conafor recibió reportes donde el insecto invadió predios en Balleza, extendiéndose a territorios forestales de Bocoyna, Carichí, Chihuahua, Cuauhtémoc, Cusihuirachi, Guerrero, Madera, Nonoava y Riva Palacio; en total, dieciocho ejidos, diez propiedades privadas, una colonia agrícola y un parque nacional, se vieron afectados. Los insectos dañaron varias hectáreas de pinos generando una mortalidad severa (Conafor, 2014).

La relevancia en este proyecto está dada por la reciente aparición del *Ips confusus* en una región al norte del municipio de Cuauhtémoc, en el estado de Chihuahua (Maldonado, Moreno, & Alatorre, 2013). De manera específica, la colonia Chupaderos, localizada al noreste del municipio y distinguida por tener tanto terrenos agrícolas como forestales, presenta una grave afectación en el bosque de *Pinus cembroides*, y sin duda la pérdida de este puede traer graves consecuencias económicas y ecológicas para la zona. Entre las afectaciones económicas está la baja producción de la semilla de piñón, que tiene un gran valor económico;

además, la creciente pérdida produce una afectación del ecosistema del bosque de la región (García, & Cibrián, 2011).

Para el estudio de esta problemática, las nuevas herramientas tecnológicas, como los sistemas de percepción remota, son de gran ayuda, porque permiten adquirir información sobre algún objeto o fenómeno a distancia sin tener un contacto directo (Chuvieco, 1995). Para lograr identificar ciertas coberturas de uso de los suelos, se pueden aplicar métodos, como la clasificación supervisada (Loya *et al.*, 2012).

Se puede dar seguimiento a las variaciones que ha tenido esta especie, a través de imágenes de satélite e índices de vegetación. Algunas imágenes de satélite de la serie Landsat generan información de gran interés para el seguimiento de la vegetación a escala regional; la resolución temporal al obtener imágenes cada dieciséis días permite plantear un seguimiento continuo en los cambios de la vegetación en cuanto a su verdor y actividad fotosintética aplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Ceroni, Achkar, & Gazzano, 2013).

Existen diversos estudios donde se han aplicado distintas metodologías mediante imágenes satelitales (Chuvieco, 1998), a través de las cuales se detectan los cambios estacionales que se presentan en la vegetación (Gómez, 2005). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, la cual se calcula a partir de las diferencias entre la región del espectro electromagnético del rojo (0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ) y del infrarrojo cercano (0.7-2.0  $\mu\text{m}$ ) (Semar, 2012), y que se presenta en valores que van de -1 a +1 (Meneses, 2012), permitiendo conocer el estado del vigor vegetal de grandes superficies al detectar fenómenos de amplio rango de variación (Iglesias, Barchuk, & Grilli, 2010).

Por otro lado, la generación de modelos que permita observar la distribución de las especies para determinar el nicho ecológico (Fierro *et al.*, 2013) también es posible para identificar el área de dispersión de las plagas forestales y para observar la tendencia de propagación, además de delimitar las áreas potenciales de ocurrencia. Actualmente, uno de los modelos más empleados para este propósito es el de la Máxima Entropía (MaxEnt), que explicita la distribución geográfica de las especies, utilizando como datos solo los sitios de presencia y las variables bioclimáticas asociadas a cada uno de dichos puntos de presencia (Pérez, 2014).

Todos los métodos mencionados en combinación con los sistemas de información geográfica (SIG) permiten realizar de una mejor manera el análisis en la zona afectada.

## DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

La especie de pino afectada, cuyo nombre común es pino piñón, es del género *Pinus* y de la especie *cembroides*. El pino piñonero es una especie originaria de México y se extiende hacia el sur de Estados Unidos. Es un árbol de cinco a diez metros, aunque puede llegar a medir hasta 15 m de altura; posee ramas ascendentes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo. Es una especie de lento crecimiento. Los árboles tardan varios años en fructificar por primera vez, de 36 meses, y la producción de la semilla se da cada cinco o seis años. Se encuentra en asociación con los bosques de coníferas y es una de las especies de pino con mayor distribución en México (Conafor, 2011).

Sus requerimientos ambientales son rangos de altitud en valores medios que van de 2100 a 3100 m; mientras que la temperatura muestra rangos de -7 a 42 °C con una media de 17.9 °C; en cuanto a la precipitación, los rangos se presentan desde 365 a 800 mm anuales (Conafor, 2011). De acuerdo con el estudio presentado por Flores *et al.*, 2003, los aspectos ambientales bióticos que afectan a *Pinus cembroides* se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Plagas presentes en *Pinus cembroides*

Hospedero	Pinus cembroides			
Insectos raiceros	<i>Gallina ciega (Phyllophaga spp.)</i>			
Insectos defoliadores	<i>Gusanos de bolsa (Lophocmpa cibarini)</i>	<i>Tetralopha sp.</i>	<i>Aphis sp.</i>	<i>Pineus sp.</i>
Insectos carpófagos	<i>Conophthoruscembroides</i>	<i>Leptoglossus occidentalis</i>	<i>Eucosma bobana</i>	<i>Cecidomyia sp.</i>
Insectos descortezadores	<i>Ips confusus</i>	<i>Dendroctonus appropinquatus</i>	<i>Pityophthorus sp.</i>	
Barrenador de yemas y brotes	<i>Retinia arizonensis</i>	<i>Conophthorus terminalis</i>	<i>Dioryctria sp.</i>	

**Fuente:** (Flores, *et al.*, 2003)

## PROCESO DE AFECTACIÓN

El descortezador *Ips confusus* es el que más daño causa en los pinos piñoneros. Se tienen registros de distribución únicamente en Baja California, Chihuahua, Coahuila, Hidalgo y San Luis Potosí. Presentan un ciclo de vida muy particular, ya que existen de tres a cuatro generaciones por año, provocando daños de mayor manera en árboles moribundos, recién muertos en pie, árboles recién caídos y trocería recién cortada. En condiciones favorables para los insectos, estos pueden matar árboles aparentemente sanos, caso en el que prefieren los maduros. Cuando atacan árboles recién muertos, se observan acumulaciones de aserrín rojizo en las hendiduras de la corteza; en cambio, cuando infestan árboles vivos los ataques quedan marcados por un grumo de resina blanquecino o rojizo. Las infestaciones del descortezador, se presentan en las ramas y en la parte alta del fuste (Cibrián *et al.*, 1995).

Los síntomas se manifiestan con un cambio de color verde a amarillento. Otros estudios demuestran que los síntomas observados fueron la marchitez de los brotes nuevos; los cuales toman una coloración verde pálido, posteriormente se tornaron amarillentos y, por último, rojizos. Las acículas que tomaron esta coloración, se desprendieron fácilmente del tallo. Las raíces fueron escasas, presentaron pudrición y se quebraron fácilmente; el tallo no presentaba resinación pero sí pudrición (Mendoza *et al.*, 2011). El pino se degrada en poco tiempo, provocando la pudrición de la base y, consecuentemente, secándose por completo, no permitiendo la recuperación de la especie. Las muestras tomadas en campo en noviembre de 2014, demuestran la gran población de estos insectos (Figura 1).

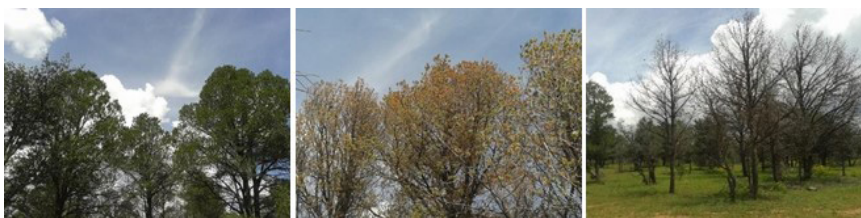
Figura 1. *Ips confusus*



Fuente: elaboración propia. Muestra tomada el 2 de noviembre de 2014.

El descortezador se puede identificar por su etapa de madurez: los que se encuentran en tonalidad de color negro son aquellos de edad adulta y que están en etapa de reproducción, mientras que los que presentan tonalidades café y amarillenta son los que aún están preparándose para la etapa de reproducción. La muestra fue tomada en un solo pino piñonero, retirando la corteza de una superficie aproximada de 0.20 m<sup>2</sup>. Las fotografías tomadas en campo en el verano de 2014, demuestran de forma clara el proceso de afectación. La Figura 2A muestra un bosque sano, característico por las hojas aciculares en tonalidades verdes y un denso dosel forestal; la Figura 2B presenta *Pinus cembroides* en tonalidades amarillentas, indicando el inicio del daño; y, por último, la Figura 2C muestra la fase final de la afectación, donde la población de pinos ya no presenta ninguna actividad fotosintética y, por lo tanto, no es posible la recuperación.

**Figura 2:** A) Bosque de *Pinus cembroides* sano; B) Bosque de *Pinus cembroides* con fase de afectación intermedia; C) Bosque de *Pinus cembroides* seco por plaga



Fuente: elaboración propia

El presente proyecto de investigación aborda una temática de gran relevancia en la actualidad, por medio de técnicas de sensoría remota, SIG y modelado de nicho ecológico. Es de vital importancia dar un seguimiento a la problemática planteada, ya que en la zona de estudio no se ha presentado ningún interés por parte de las dependencias encargadas de controlar estos procesos de degradación forestal.

Es muy importante poder dar un diagnóstico de la evolución temporal de los procesos de degradación y el orden de magnitud (velocidad de propagación), para poder evitar que zonas similares puedan ser afectadas. Si bien la comunidad no es de gran interés turístico, o de gran calado forestal para la extracción de recursos maderables, el bosque que existe en la región sí presenta beneficios: en primer lugar, el bienestar del ecosistema y, en segundo, la economía para los habitantes de la comunidad que se dedican a la recolección de las semillas de piñón que produce el pino piñonero.

Realizar la investigación fue factible, ya que la zona es de fácil acceso y no implicó grandes costos de traslado para realizar el trabajo de campo, mientras que la información de gabinete necesaria también se pudo adquirir, porque únicamente se utilizaron imágenes satelitales de acceso gratuito del servidor web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y, a partir de ellas, se realizaron ciertos procedimientos y análisis. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo es analizar la evolución temporal y espacial de la actividad vegetal en la especie de *Pinus cembroides*, aplicando sistemas de percepción remota y SIG para caracterizar el proceso de degradación a causa del descortezador *Ips confusus*.

Y su hipótesis es que la utilización de una serie temporal de NDVI permite determinar la variación temporal y espacial de los procesos de degradación que actualmente aquejan al bosque de pino piñonero en el estado de Chihuahua. Además, mediante modelos de MaxEnt es posible identificar el nicho ecológico del pino piñonero, así como el descortezador *Ips confusus* para verificar su coincidencia espacial.

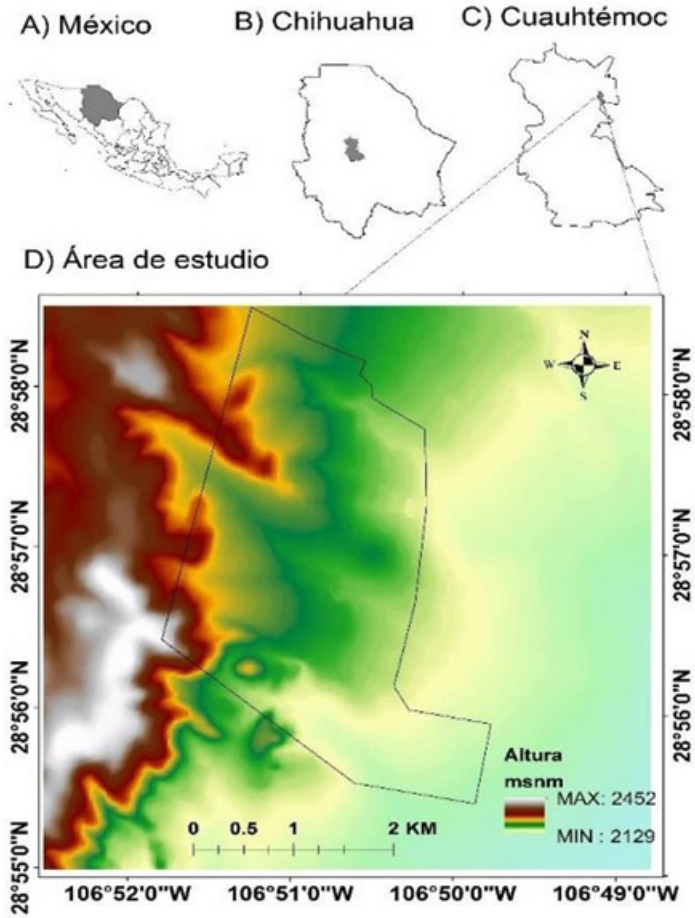
## Metodología

### ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la región noreste del municipio de Cuauhtémoc en el estado de Chihuahua. El poblado donde se realiza el proyecto se localiza en las coordenadas geográficas 28°55'40" N y -106°50'17" O. Limita al oeste con propiedades privadas, al norte y este con terrenos agrícolas pertenecientes a la colonia Chupaderos y al sur con el municipio de Riva Palacio (Figura 3). El área comprende una extensión de 1030 ha, con una altura promedio de 2200 msnm, entre las que se encuentran zonas de pastizales y bosques en asociación de pino-encino.



Figura 3. Localización del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Datos del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed, 2014) describen las características del medio físico propias del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. La orografía comprende la subprovincia fisiográfica, sierras y llanuras tarahumaras de la provincia denominada sierra Madre Occidental. El relieve en el área de

la colonia Chupaderos se conforma de serranías y llanuras con lomeríos en alturas que van de 2152 a 2442 msnm.

En cuestiones de hidrografía, el agua superficial se localiza básicamente en pequeños cuerpos de agua superficial; no cuenta con ríos, pero la zona es atravesada por varios arroyos, la mayor parte de ellos solo llevan agua en temporada de lluvias, que pertenecen en su totalidad a la vertiente interior formada por la cuenca de la laguna de Bustillos. El clima es considerado de transición, de semihúmedo a templado, con una temperatura media anual de 14 °C, una máxima de 22 °C y una mínima de 4 °C. La precipitación pluvial media anual es de 440-500 mm y tiene un promedio anual de 66 días de lluvia (García, 2014).

La vegetación existente consta de pastos, cactáceas, arbustivas y herbáceas. En el ecosistema de la fauna, se encuentran aves migratorias, guajolotes, correcaminos, palomas de collar, conejos, venados cola blanca, pumas, gatos monteses y coyotes. La región se encuentra ocupada por bosques de pino, pino-encino, encino y regiones aisladas de táscate (Inafed, 2014).

El tipo de suelo es ocupado en su mayoría por el tipo feozem, que significa tierra parda, y se caracteriza por tener una marcada acumulación de materia orgánica en su parte superior, por lo cual son fértiles y soportan una gran variedad de cultivos, así como pastizales; también se encuentran el planosol y el litosol, que son suelos de piedra (Alatorre *et al.*, 2014).

## SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para la elaboración de la clasificación de cobertura y uso de suelo, a través de métodos de clasificación supervisada, se trabajó con la imagen perteneciente al sensor Landsat 8 OLI, con fecha de adquisición 5/03/2014. Para la construcción de la serie temporal de imágenes Landsat, se obtuvieron las satelitales del servidor de USGS (<http://glovis.usgs.gov/>), las cuales corresponden a distintos sensores, entre ellos, Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI. Todas con una resolución espacial en la banda pancromática de 15 m y la multiespectral, de 30 m, además de una resolución temporal de 16 días (Inegi, 2014). Las imágenes seleccionadas para la serie temporal se encuentran en la proyección Universal Transversal Mercator (UTM) zona

13 N, Path/Row 33/40, las cuales corresponden a marzo y abril, meses de inicio de la primavera, para el periodo 2000-2014.

**Tabla 2.** Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio, para identificar la dinámica vegetal en el periodo 2000-2014

Imagen	Sensor	Fecha de adquisición
1	Landsat 5 TM	01/05/2000
2	Landsat 5 TM	17/03/2001
3	Landsat 5 TM	01/04/2003
4	Landsat 5 TM	09/03/2004
5	Landsat 5 TM	11/03/2007
6	Landsat 5 TM	11/03/2008
7	Landsat 5 TM	16/03/2009
8	Landsat 5 TM	19/03/2010
9	Landsat 5 TM	07/04/2011
10	Landsat 8 OLI	19/04/2013
11	Landsat 8 OLI	19/02/2014

**Fuente:** elaboración propia.

Por otra parte, se realizó un análisis interanual, con la finalidad de observar el comportamiento de la vegetación en las distintas estaciones del año. Para ello, se obtuvieron imágenes de forma estacional, es decir, desde enero hasta diciembre, para los años 2000 y 2014 (Tabla 3), en donde se presentaron algunos meses que están descubiertos de información, debido a la presencia nubosa en la temporada de lluvias.

Para la correcta utilización de las imágenes fue necesario efectuar algunas correcciones. Una de ellas es la corrección atmosférica, que elimina los ruidos causados a la señal que llega al sensor del satélite luego de haber atravesado la atmósfera; el efecto de distorsión de la señal produce errores en la localización de los niveles digitales (ND) de los píxeles. Además, pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de manera que no coincidan con el tono, posición y tamaño de los objetos (Chuvieco, 1995). La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas, por lo que estos pueden ser sustanciales y deben ser corregidos; para ello, se aplicó a cada una

de las imágenes una corrección con el módulo *ATMOSC* del *software* IDRISI (Brizuela, Aguirre, & Velasco, 2007).

**Tabla 3.** Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio para identificar la dinámica vegetal de forma estacional para los años 2000 y 2014

Imagen	Landsat 5 <sup>TM</sup> Año 2000	Landsat 8 <sup>OLI</sup> Año 2014
1	10/01/2000	16/01/2014
2	27/02/2000	17/02/2014
3	14/03/2000	05/03/2014
4	15/04/2000	08/05/2014
5	06/09/2000	15/10/2014
6	09/11/2000	16/11/2014

**Fuente:** elaboración propia.

Una vez que las imágenes fueron corregidas atmosféricamente, se aplicó un proceso de georreferenciación, esto es, se utilizaron puntos de control para garantizar que las áreas coincidieran con las imágenes, para luego proceder a recortar el área de estudio con base en el polígono delimitado anteriormente.

Para desarrollar la modelación de la presencia de la especie del descortezador *Ips confusus* en la especie de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua, se trabajó con puntos de ocurrencia derivada de Global Biodiversity Information Facility (<http://data.gbif.org/occurrences>).

Primeramente, para la especie de *Pinus cembroides* se obtuvieron los puntos de presencia para todo México y, posteriormente, la base de datos fue depurada, seleccionando los registros dentro de Chihuahua, además de eliminar aquellos duplicados. La base de datos original contaba con un total de 599 ocurrencias de *Pinus cembroides*, mientras que la base de datos final cuenta con 26 puntos, a la que se le agregaron puntos tomados en campo y proporcionados por la Comisión Nacional Forestal (Conafor).

La generación de la base de datos de *Ips confusus*, se elaboró a partir de registros presentes en el estado de Chihuahua, datos proporcionados por la Conafor en los años 2012 y 2013, además de puntos tomados de igual manera en campo dentro del área de estudio.

Para la modelación del nicho ecológico, se adquirieron variables bioclimáticas de WorldClim (<http://www.worldclim.org/current>). También fue adquirido un modelo digital de elevaciones, del cual se derivaron diferentes variables topográficas (Hijmans *et al.*, 2005).

## Elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo

Para el correcto funcionamiento del algoritmo de clasificación, es preciso establecer un conjunto de categorías que representen de forma adecuada la variabilidad de las cubiertas presentes en la totalidad del área de estudio (Alatorre *et al.*, 2014). El procedimiento consiste en la definición de categorías temáticas; de igual manera, la creación de áreas de entrenamiento representativas de las coberturas vegetales y uso de suelo se establecen con base en el conocimiento previo del área de estudio y los puntos de control tomados en campo de las siguientes categorías: bosque de pino, bosque de pino seco, bosque de pino-encino, pastizales, cuerpos de agua y zona agrícola.

La imagen utilizada para la clasificación supervisada corresponde al sensor Landsat 8 con fecha de adquisición 5/3/2014, la cual cuenta con una resolución espacial de 30 m en la banda multiespectral. El *software* a utilizar es IDRISI (versión Selva), con el módulo conocido como MAXLIKE, que genera una clasificación de máxima probabilidad de los datos de teledetección basada en la información contenida en un conjunto de archivos de firmas espectrales.

Los píxeles se asignan a la clase más probable sobre la base de una comparación de la probabilidad posterior de que puede pertenecer a cada una de las firmas espectrales que se consideren (IDRISI, 2014).

Posteriormente, se aplicó una validación a través de una matriz de confusión (Congalton, 1991), a partir de puntos tomados en campo y por fotointerpretación en imágenes de alta resolución proporcionadas por Google Earth.

## CONSTRUCCIÓN DE LA SERIE TEMPORAL DEL NDVI

Para realizar el análisis temporal de la actividad vegetal, se construyó una serie temporal del NDVI, que arroja valores estimados del verdor del

bosque que resultan del análisis de datos espectrales obtenidos mediante imágenes de satélite. Se parte de la premisa de que el NDVI representa un indicador de la salud de la vegetación del ecosistema, que mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, arrojando valores de la intensidad del verdor de la zona, y que da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie, así como su estado de salud. Es un índice adimensional y sus valores van de -1 a +1 (Meneses, 2012).

Los valores del índice que se encuentran por debajo del cero representan cuerpos de agua y suelo descubierto, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de bosque, pastizal y actividad agrícola. Las series temporales del NDVI fueron obtenidas a partir de las imágenes Landsat, con el propósito de monitorizar la actividad vegetal. El NDVI debe ser calculado como se muestra en la siguiente ecuación (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $P_{IR}$  = Reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético
- $P_R$  = Reflectividad en la región del rojo

### Construcción de las series temporales de variables climáticas

La actividad vegetal se puede ver afectada por factores climáticos, como la disminución de la precipitación y temperaturas máximas y mínimas extremas. Para determinar el efecto de estos factores sobre las tendencias temporales de la actividad vegetal, se creó una serie temporal de variables climáticas (Medina, & Miramontes, 2014).

Para la obtención de la base de datos, se adquirió información existente en estaciones climatológicas pertenecientes a la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (Unifrut, <http://>

www.unifrut.com.mx). Estas estaciones se encuentran en operación desde el año 2000 hasta la actualidad, recogiendo información diaria de diversas variables climatológicas. Para el presente trabajo, se utilizó la información de la estación ubicada en la colonia Álvaro Obregón del municipio de Cuauhtémoc (latitud: 28°45'56.6" N y longitud: 106°55'03.3" O), localizada a 20 km en línea recta al suroeste de la zona de estudio: la colonia Chupaderos.

La estación meteorológica genera información de las siguientes variables climatológicas: i) precipitación media anual ( $P_{MA}$ ; mm año<sup>-1</sup>); ii) temperatura media anual ( $T_{MA}$ ; °C); iii) temperatura mínima media anual ( $T_{MINA}$ ; °C); y iv) temperatura máxima media anual ( $T_{MAXA}$ ; °C) (García, 2014).

### **Análisis estadístico $NDVI$ vs. variables climáticas**

Las series temporales de  $NDVI$  para las distintas coberturas presentes en el área de estudio fueron analizadas para determinar la presencia de tendencias temporales estadísticamente significativas; para ello, se utilizó la correlación de Spearman contra el tiempo (Alatorre, Beguería, & Vicente, 2010). Este tipo de análisis permite observar la dinámica vegetal en términos de incremento (correlación positiva) y de descenso de la actividad (correlación negativa).

Como un paso previo para analizar los efectos del clima sobre la actividad vegetal, se realizó un análisis de correlación para determinar cuál de las series se ajusta mejor a los datos observados del  $NDVI$ . Para ello, las precipitaciones totales y las temperaturas máximas/mínimas medias se calcularon a partir de la serie diaria original, sumando los valores diarios durante el periodo inmediatamente anterior a la fecha de cada imagen. Así, las series climáticas se calcularon para los siguientes periodos previos a la fecha de la imagen: 15 días, 30 días, tres meses (enero, febrero y marzo para las imágenes de marzo) y seis meses (de marzo a agosto).

La prueba de Spearman permite detectar la presencia de tendencias temporales en las series del  $NDVI$ , pero no identifica los factores implicados. Por ello, una vez que se determinó cuáles de las series mencionadas

tienen un mejor ajuste, se procedió a aplicar una regresión multivariante de los valores medios del NDVI contra las variables climáticas en cada una de las coberturas (Medina, & Miramontes, 2014), para así determinar el grado de control que el clima ejerce sobre la actividad vegetal.

### ANÁLISIS ESPACIALMENTE DISTRIBUIDO DE LAS TENDENCIAS DEL NDVI

Para realizar un análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, la regresión multivariante se repitió pixel a pixel para toda la región, para obtener un mapa espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI que no pueden ser explicadas por las variables climáticas, y así identificar las áreas que experimentan procesos de degradación o recuperación vegetal. Para ello, se aplicó el análisis Mann-Kendall, en el *software* IDRISI (versión Selva).

La estadística Mann-Kendall es la frecuencia relativa de aumentos menos la frecuencia relativa de disminuciones, donde todas las combinaciones de pares de valores a través del tiempo son evaluadas en cada pixel y se realiza tomando en cuenta los números que están aumentando o disminuyendo con el tiempo; en esta estadística, la serie de tiempo es la variable dependiente y el tiempo, la variable independiente (Santana *et al.*, 2013).

### Modelación para la presencia y propagación del descortezador *Ips confusus* en las regiones de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua

La presencia de los descortezadores en los bosques de pino puede ser modelada a través del *software* MaxEnt, método que permite determinar el nicho ecológico y las áreas de distribución (Conabio, 2014a). El funcionamiento de MaxEnt se basa en tomar una lista de ubicaciones de presencia de especies como datos de entrada, además de un conjunto de predicciones ambientales (por ejemplo, temperatura y precipitación), a través de un *grid* de la región de estudio, que es de donde MaxEnt extrae una muestra de ciertas estaciones que contrastan con los lugares donde



existe presencia de las especies analizadas (Merow, Smith, & Silander, 2013).

Para la modelación fueron utilizadas un conjunto de 24 variables biofísicas continuas (Tabla 4), conformadas por 5 variables topográficas derivadas de un modelo digital de elevaciones y 19 variables bioclimáticas derivadas de las bases de datos de WorldClim (0.008 de pixel y 30 arc- segundos ~ 1 km) (Hijmans *et al.*, 2005).

Las variables ambientales fueron utilizadas de igual manera para modelar el nicho ecológico del pino y del descortezador. Se emplearon los datos puntuales con el nombre de la especie y las coordenadas en grados decimales, tanto para latitud como longitud, además de las variables que se deben convertir de formato ráster y cambiar a formato ASCII. Se ejecutó el modelado a través del *software* MaxEnt, se generaron diez réplicas, con cincuenta pruebas al azar y un modelo de tipo *bootstrap*, que permite obtener estimaciones de medidas de precisión, así como la realización de contrastes de hipótesis en aquellas situaciones en las que no se dispone de información acerca de la distribución (Pérez, 2014).

Los modelos resultantes fueron analizados para saber cuál es el que presenta una mejor fiabilidad. Se seleccionaron los tres modelos con el área bajo la curva (AUC) más alta, los cuales fueron importados en Arc-Map y convertidos en tipo flotante para que conservaran los datos originales. Posteriormente, se sumaron los tres mejores modelos creando un mapa consenso, que se reclasificaron en dos categorías con base en el 10 percentil (que indica la probabilidad de que el 10 % de los puntos de presencia pueden caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial), generando un mapa dicotómico de presencia-ausencia de especies. El procedimiento generado se realizó para las dos especies en cuestión.

**Tabla 4.** Variables climáticas consideradas en el proceso de modelado

Código	Variable ambiental
BIO 1	Temperatura media anual
BIO 2	Rango de temperatura media mensual
BIO 3	Isotermalidad (P2/P7)(*100)

*Continúa...*

Código	Variable ambiental
BIO 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 7	Rango anual de temperatura (P5-P6)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 9	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 10	Temperatura media del trimestre más seco
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío
SLOPE	Pendiente en grados
ASPECT	Orientación de ladera
ALTITUD	Metros sobre el nivel del mar
HILLS	Sombreado
FACUM	Acumulación de flujo

Fuente: WorldClim (2014).

## Identificación de zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua

A partir de los dos modelos de especies generados en MaxEnt (Pino piñonero y plaga de descortezador), se realizó un cruce de información para identificar únicamente las zonas donde existen ambas especies. Para realizar un mejoramiento a este mapa resultante, se obtuvieron de la serie V de cobertura y uso de suelo aquellas categorías que correspondían a pino y su asociación con otro tipo de vegetación, como el encino, asignándoles un valor de presencia, mientras que todas aquellas coberturas que no correspondieran a pino serían de ausencia. Posteriormente, se cruzaron el mapa de coberturas y el mapa dicotómico de ambas especies, y se encontró un área más delimitada y específica para la presencia de

*Ips confusus* en el bosque de pino, en específico para la especie de *Pinus cembroides*.

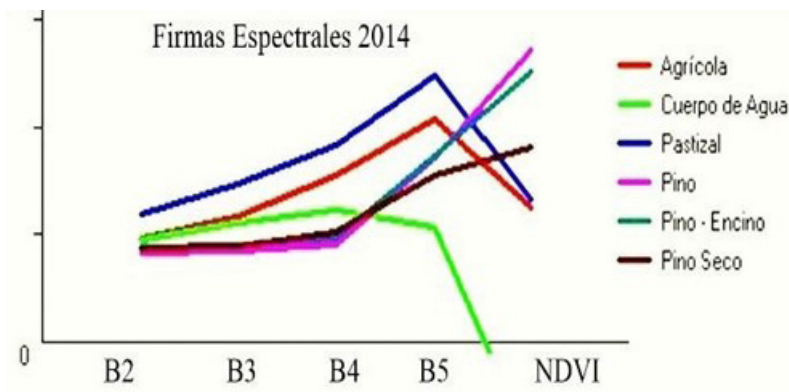
## Resultados

### ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO

Mediante las categorías establecidas para la cobertura y uso de suelo determinadas previamente, se procedió a la digitalización de las áreas de entrenamiento y, posteriormente, a la elaboración de la clasificación supervisada a través del módulo MAXLIKE. Se obtuvieron las firmas espectrales de dichas coberturas, se compararon con las bandas del espectro visible, además de la del infrarrojo, y se añadió una banda del NDVI para obtener una mejor separabilidad en las firmas (Alatorre *et al.*, 2015).

En la Figura 4 se observa que la banda del infrarrojo en Landsat 8 presenta una mejor discriminación, apoyada por la información espectral que nos brinda la banda del NDVI, la cual ayuda a que esta separabilidad sea mayor. Identificando que la clase de interés, en este caso la cubierta de pino seco, sea la que logre discriminarse de las demás cubiertas del bosque. Debido a la época del año (término del invierno), las cubiertas de pastizal y agricultura no presentan elevada actividad fotosintética, seguidas de la zona de bosque con pino seco, que se encuentra en condiciones muy similares; en cambio, aquellas zonas que no se encuentran con afectación tienen un elevado valor de vegetación, como el caso del bosque de pino y en su asociación con el encino. En el caso de los cuerpos de agua en las bandas 5 y NDVI, sus valores se encuentran en declive, debido a que la energía es absorbida en esos rangos del espectro. Una vez que se observó la separabilidad espectral, se aplicó el método de clasificación MAXLIKE, tomando en cuenta que las áreas de entrenamiento estaban bien definidas (Alatorre *et al.*, 2015).

Figura 4. Firmas espectrales para las distintas cubiertas y uso de suelo para el año 2014



Fuente: elaboración propia.

Se realizó la validación a través de la matriz de confusión (Tabla 5), para un total de 253 puntos de control, a través de un muestreo estratificado y en comparación con una imagen de alta resolución obtenida de Google Earth. La intersección en la misma categoría son los aciertos obtenidos, mientras que los que caen en otra categoría se consideran errores. En total, se obtuvo una confiabilidad global de 90 %.

De acuerdo con el mapa de coberturas y uso de suelo elaborado para el año 2014 (Figura 5), se obtuvo la superficie en hectáreas que ocupaba cada categoría en el área de estudio (Tabla 6). Para el sector forestal de la colonia Chupaderos existe un total de 95 ha de pino piñonero que se han perdido, debido al ataque del descortezador *Ips confusus*.

**Tabla 5.** Matriz de confusión de la clasificación aplicada a la muestra de entrenamiento (puntos por categoría)

	AG	CP	PZ	P	PE	PS	Total
AG	49	0	1	0	0	0	50
CP	0	3	0	0	0	0	3
PZ	3	0	39	0	8	0	50
P	0	0	1	47	2	0	50
PE	0	0	1	0	47	2	50
PS	0	0	0	1	6	43	50
Total	52	3	42	48	63	45	253
EP	0.94	1	0.92	0.97	0.74	0.95	
EU	0.98	1	0.78	0.94	0.94	0.86	
<b>Fiabilidad global: 0.90</b>							

**Fuente:** elaboración propia.

\* AG: agrícola; CA: cuerpo de agua; PZ: pastizal; P: pino; PE: pino-encino; PS: pino seco; EP: exactitud del productor; EU: exactitud del usuario.

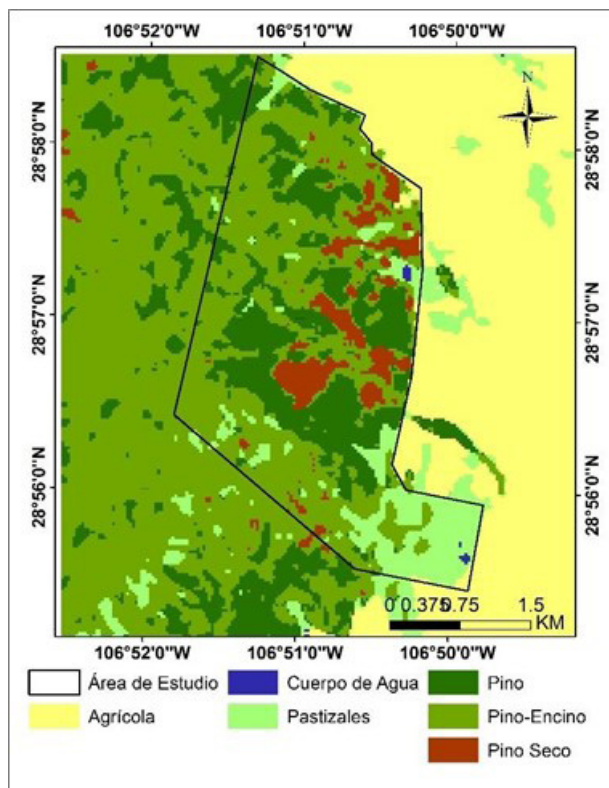
**Tabla 6.** Cobertura en hectáreas del área de estudio para cada categoría

Cobertura y uso de suelo	Hectáreas	Porcentaje de ocupación (%)
Agrícola	12	1.16
Cuerpo de agua	2	0.19
Pastizal	141	13.68
Pino	286	27.76
Pino-encino	494	47.96
Pino seco	95	9.22
Total	1030	100 %

**Fuente:** elaboración propia.

En la cartografía de cobertura y uso de suelo (Figura 5), se puede observar la región afectada en una zona muy específica. El ecosistema se encuentra fragmentado y la posibilidad de expansión de la plaga hacia las regiones de pino, puede ser muy favorable.

**Figura 5.** Cartografía de cobertura y uso de suelo (2014), zona forestal de la colonia Chupaderos



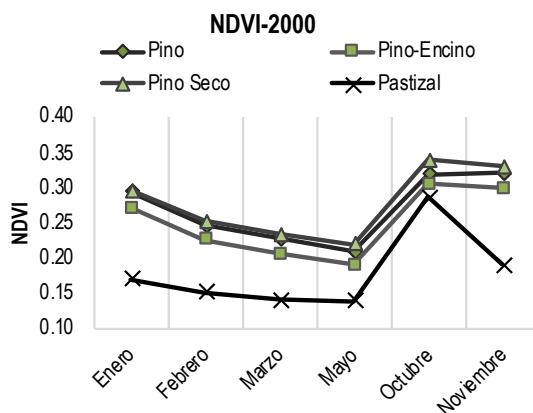
Fuente: elaboración propia.

### SERIE TEMPORAL DEL NDVI Y VARIABLES CLIMÁTICAS (ESTACIONAL): 2000 Y 2014

Se llevó a cabo una evaluación preliminar de las tendencias temporales del NDVI para las áreas analizadas, con especial interés en las regiones de pino. Cabe hacer mención que la categoría de pino seco clasificada para 2014, fue utilizada de igual manera en el año 2000, con la diferencia de que esta se encontraba en condiciones estables. En las figuras 6 y 7, se puede observar la comparación entre las dos series del NDVI distintas de forma estacional. La categoría de pino seco para el año 2000 cuenta con

valores del NDVI iguales a las demás regiones de pino, época en la que no existía ninguna afectación por el descortezador.

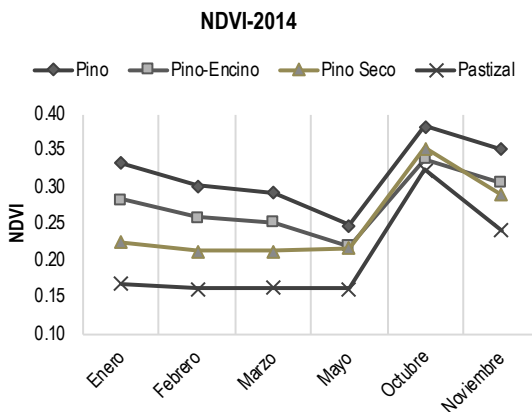
**Figura 6.** Evolución temporal de los valores medios del NDVI para el año 2000



Fuente: elaboración propia.

Se tomaron los valores medios del NDVI para el año 2014, observando que las áreas afectadas (pino seco) presentaron una disminución considerable en los valores de la vegetación (Figura 7). Cabe mencionar que la cobertura de pino seco cuenta con actividad vegetal (valores altos del NDVI), debido a la vegetación secundaria como el pastizal que se encuentra debajo de los pinos secos, o bien, por especies arbóreas aisladas como la asociación con el encino (sotobosque). En ambas temporadas, se observa un aumento considerable de actividad vegetal a partir del verano, dejando únicamente los meses de inicio del año para poder identificar de manera clara las diferencias entre las temporadas analizadas.

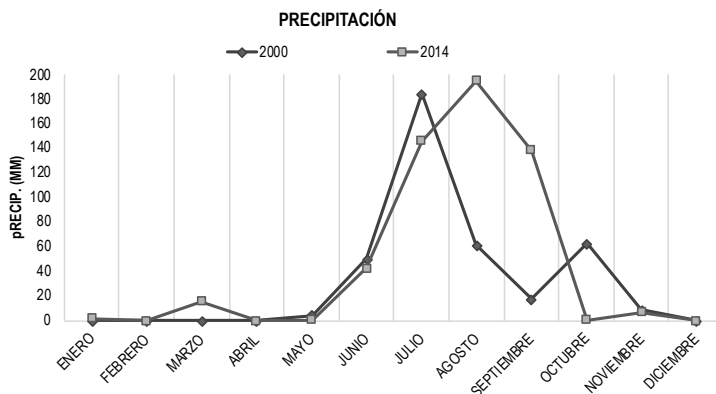
**Figura 7.** Evolución temporal de los valores medios del NDVI para el año 2014



**Fuente:** elaboración propia.

El análisis preliminar de las series climáticas para las dos temporadas anuales analizadas (2000 y 2014) muestra valores similares durante todo el año entre las dos series (Figura 8). En cuanto a la precipitación durante el año 2000 se acumularon 390 mm, mientras que 2014 se presentó como un año con mayor precipitación, llegando a 548 mm. La serie temporal de temperaturas máxima/mínima (Figura 9) presenta una tendencia regular y muy similar durante el año.

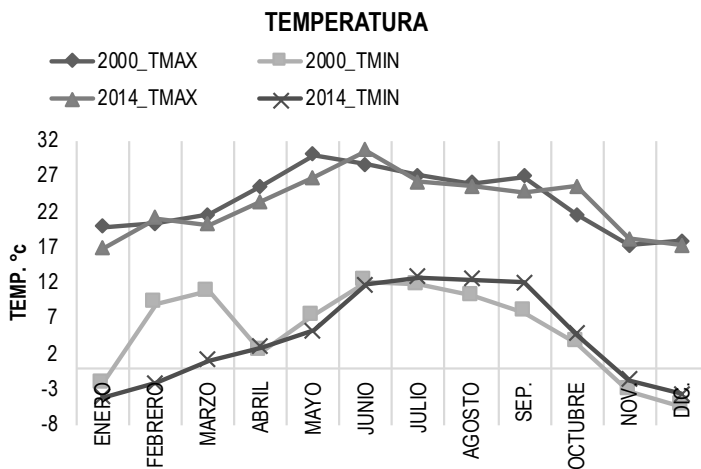
**Figura 8.** Evolución temporal de la precipitación en los años 2000 y 2014



**Fuente:** elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.



Figura 9. Evolución temporal de la temperatura en los años 2000 y 2014



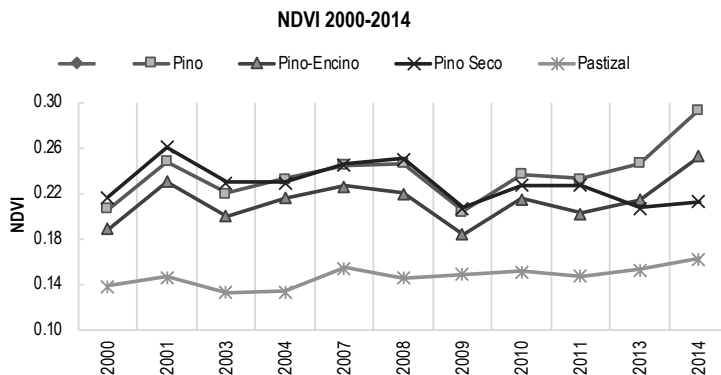
Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

De manera visual, las series climáticas de forma estacional no demuestran un gran evento que pudiera verse relacionado con el NDVI; sin embargo, en el apartado siguiente se demuestra de manera anual la tendencia, tanto de las series climáticas como del NDVI.

#### SERIE TEMPORAL DEL NDVI Y VARIABLES CLIMÁTICAS (ANUAL): 2000-2014

De la misma manera, se realizó el análisis, ahora incluyendo todos los años entre estas dos temporadas, se observó una tendencia más significativa en las variables. Visualmente es evidente la tendencia del NDVI en la cobertura de pino seco (Figura 10), debido a que en principio de temporada (año 2000) presentaba valores incluso más elevados que las regiones de pino y pino-encino, ya que se trataba de una región con abundante actividad vegetal. A partir de la presencia de la plaga en el ciclo 2011-2013, esta tendencia disminuyó de manera considerable; las demás categorías en el año 2014 se encontraban, incluso, con tendencia positiva. De igual manera, aún cuenta con valores del NDVI debido a la vegetación secundaria presente, como el pastizal.

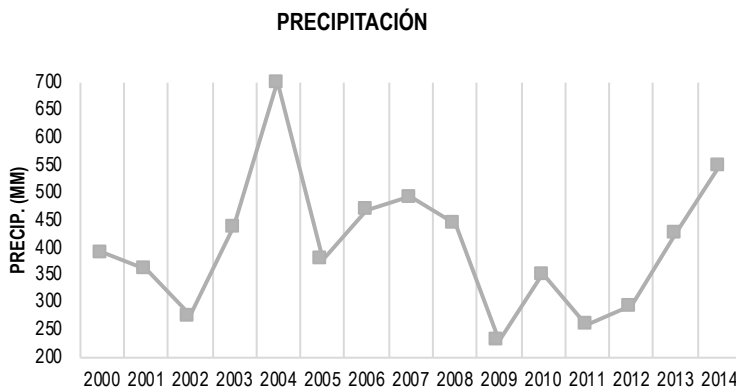
**Figura 10.** Evolución temporal de los valores medios del NDVI para el periodo 2000-2014



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con un análisis visual, en las series climáticas se encontraron valores relevantes en la precipitación, ya que se ha presentado una temporada muy variada con alzas y bajas muy considerables (Figura 11). La precipitación promedio en los últimos 15 años fue de 403 mm anuales, con registros extremos en 2004, donde se acumularon hasta 700 mm. Para 2009 solo se registraron 230 mm, siendo el año más seco; a partir de ese ciclo fue la temporada en la que estuvo presente la plaga de descortezadores (2010-2013), donde las precipitaciones alcanzaron alrededor de 300 mm anuales.

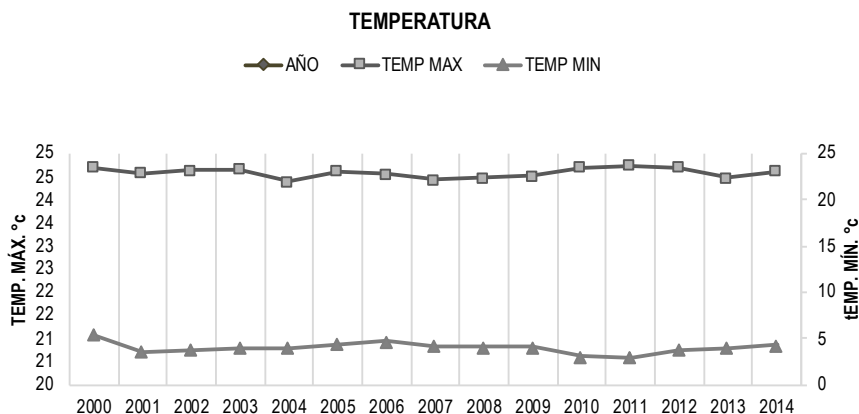
**Figura 11.** Evolución temporal de la precipitación para el periodo 2000-2014



Fuente: Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

Respecto a la serie climática en la temperatura (Figura 12), la máxima promedio anual se encuentra en 23 °C, mientras que la mínima en 4 °C. La temporada es regular, pero analizando el ciclo donde se ha presentado el problema (2010-2013), se encuentra que los valores máximos y mínimos fueron muy diferentes a los demás años. Las temperaturas máximas aumentaron por encima del promedio y, de igual manera, las temperaturas promedio mínimas disminuyeron, siendo el año 2011 más extremo en relación con la temperatura, ya que se registraron las máximas (23.72 °C) y mínimas (2.91 °C) en promedio anual más extremas.

**Figura 12.** Evolución temporal de la temperatura para el periodo 2000-2014



**Fuente:** Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

## ANÁLISIS DE LA REGRESIÓN DEL $NDVI$ CONTRA LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

El análisis estadístico de regresión multivariante, que se observa en la Tabla 7, permite explicar los patrones temporales del  $NDVI$  observados en cada cobertura en relación con variables de precipitación, temperaturas, día juliano y el tiempo transcurrido. El mejor ajuste se obtuvo en la categoría de pino seco, que es el área de interés, mientras que las otras categorías de pino y pino-encino no presentaron ajuste al modelo de regresión multivariante, descartando cualquier tendencia significativa del  $NDVI$ .

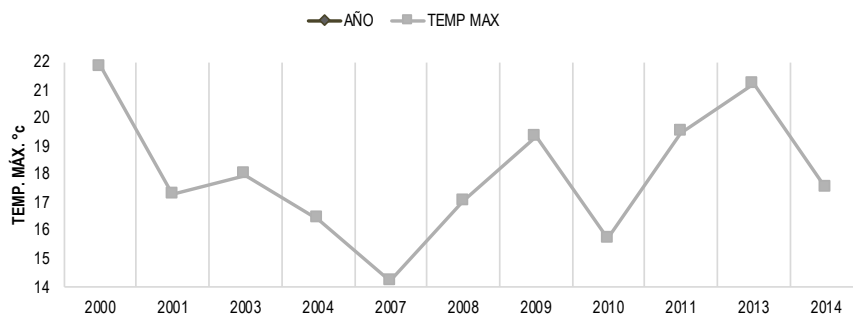
**Tabla 7.** Análisis de la regresión multivariante para los valores observados del NDVI en cada cobertura y uso de suelo

	Pino	Pino-encino	Pino seco	Pasto
R <sup>2</sup>	0.55	0.47	0.91	0.86
<i>p-Valor</i>	-	-	< 0.028*	< 0.016*
Error residual estándar	0.019	0.024	0.016	0.028
Coeficientes Beta				
Precip. 2 meses	-	-	-	-
T máx. 3 meses	-	-	-0.601	-
T mín. 3 meses	-	-	-	-
Día juliano	-	-	-	-
Tiempo (año)	-	-	-0.467	0.756
Tendencia temporal (cambio en el NDVI)				
Por año	+0.0027	+0.0014	-0.0020	+0.0015
Periodo 2000-2014	+3.78 %	+2.06 %	-2.74 %	+2.01 %

**Fuente:** elaboración propia.

Solo se encontraron dos variables que explican las tendencias temporales de la vegetación para el pino seco: se trata de la temperatura máxima en los tres meses previos y el tiempo transcurrido. En ambas variables se encontró una correlación negativa, lo que significa que al transcurrir el tiempo, en un periodo de catorce años, la vegetación disminuyó su actividad, mientras que la temperatura máxima, de acuerdo con la distribución (un clima más cálido a finales de invierno e inicios de la primavera), ha favorecido la proliferación de la plaga de descortezadores, debido a que los pinos entran en una etapa de debilidad.

**Figura 13.** Evolución temporal de la temperatura previa a tres meses para el periodo 2000-2014



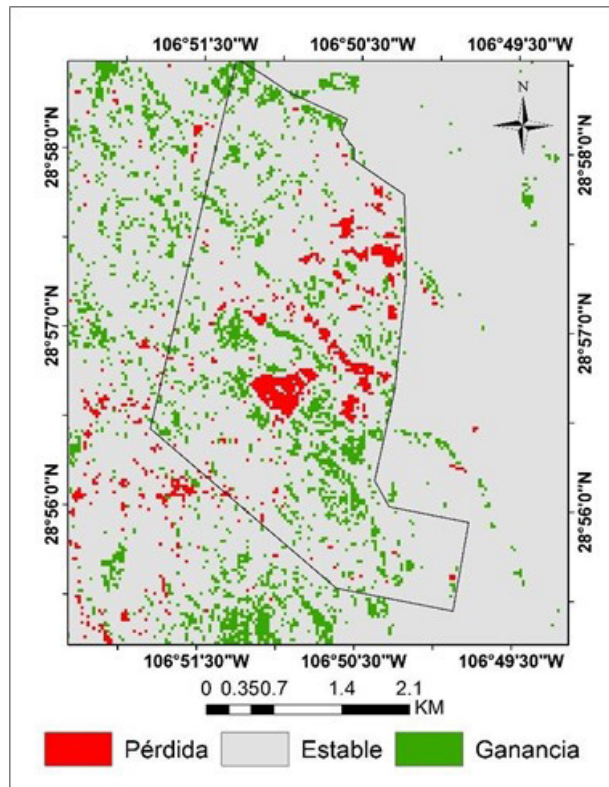
**Fuente:** elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

La variable de precipitación no ha demostrado ninguna correlación con la actividad vegetal en esa región, pero el que la precipitación acumulada no tenga ningún efecto significativo puede explicarse por la resistencia de la especie del pino a condiciones extremas. Sin embargo, Camacho (2012) menciona que el ataque de estos insectos se presenta después de eventos atmosféricos, como sequías, heladas, incendios y tormentas. La mayoría de las cubiertas presentaron una tendencia temporal positiva, con excepción de la región afectada, lo cual muestra una tendencia negativa.

El análisis Mann-Kendall, realizado a partir de la serie temporal del NDVI (2000-2014) con un estadístico significativo ( $p = 0.10$ ), permitió observar de mejor manera la tendencia de la vegetación en el área de estudio.

En la Figura 14, se puede observar que el área en su mayoría es estable, mientras que en un porcentaje menor se encuentran las zonas con tendencia positiva, clasificadas como una región de ganancia, o bien, de recuperación en la vegetación. La clase de interés es aquella que presenta alguna tendencia negativa, por lo que se trata de las regiones donde se ha perdido o degradado la vegetación. Para el área de estudio, se observa una zona muy considerable, que coincide en su gran medida con la clasificación supervisada generada con anterioridad (Figura 5), para la categoría de pino seco.

**Figura 14.** Distribución espacial de las tendencias del NDVI (2000-2014), a través del análisis Mann-Kendall



Fuente: elaboración propia.

Analizando las tendencias de vegetación con la cartografía de cobertura y uso de suelo, se puede observar el porcentaje de área correspondiente a cada clase (Tabla 8). La clase de pino seco generada en la clasificación supervisada coincide con un total de 43.7 ha, que se han perdido en su totalidad, mientras que las otras 52 ha, clasificadas como pino seco, en el análisis de distribución espacial se clasifican como estables, lo que significa que no se han recuperado, o bien, puede encontrarse en una zona de transición entre una región afectada y una sin daños.

**Tabla 8.** Análisis de la frecuencia de las tendencias temporales del NDVI en cada una de las categorías

Clase	Pérdida	Estable	Ganancia
Pino	0.9 %	72 %	271 %
	2.7 ha	206.2 ha	776 ha
Pino-encino	2.7 %	87.7 %	9.6 %
	13.4 ha	433 ha	47.3 ha
Pino seco	46.1 %	53.9 %	0 %
	43.7 ha	52 ha	0 ha
Pastizal	1 %	94.5 %	4.5 %
	1.4 ha	131.4 ha	6.3 ha

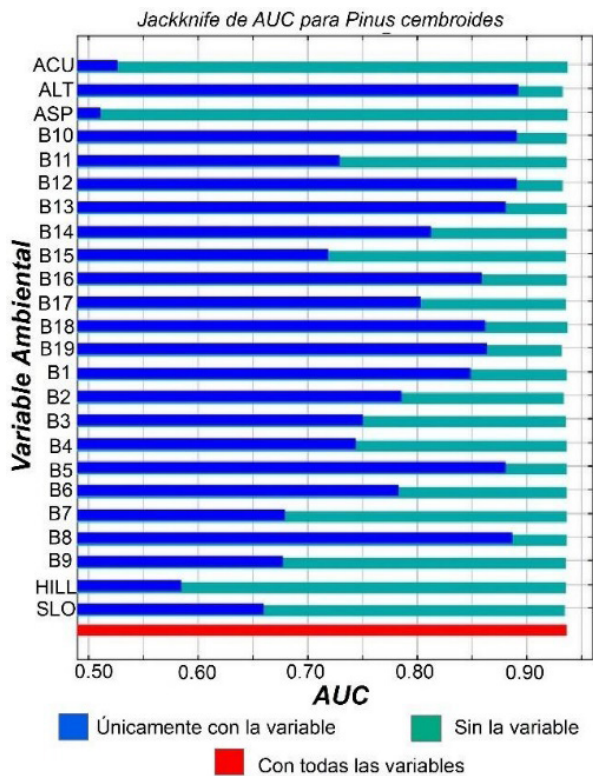
**Fuente:** elaboración propia.

### MODELACIÓN DEL NICHU ECOLÓGICO PARA LA ESPECIE *PINUS CEMBROIDES* Y EL DESCORTEZADOR *IPS CONFUSUS*, A TRAVÉS DE MAXENT

La primera especie modelada es el pino piñonero, con 28 registros de presencia, cuyo nicho ecológico de distribución se aprecia en la Figura 16, la cual se extiende a lo largo de la sierra Madre Occidental, en los límites con la altiplanicie mexicana para el estado de Chihuahua. El modelo para el pino presenta una fiabilidad elevada de 0.967. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado del pino fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO 10) con 34.3 %, seguida de la precipitación anual (BIO 12) con 16.5 % y, por último, la altitud con 10.5 % de contribución al modelado.

La Figura 15 demuestra la contribución de las diecinueve variables bioclimáticas y las cinco topográficas, a través del AUC generada por el método Jackknife en el *software* MaxEnt. El pino piñonero requiere de ciertas condiciones para desarrollarse, como la altura que es fundamental, además de la precipitación anual y la temperatura del mes más seco. Sin embargo, variables derivadas del modelo digital de elevaciones no son fundamentales para la distribución de la especie, como en el caso de la acumulación de flujo, la orientación de laderas y el sombreado.

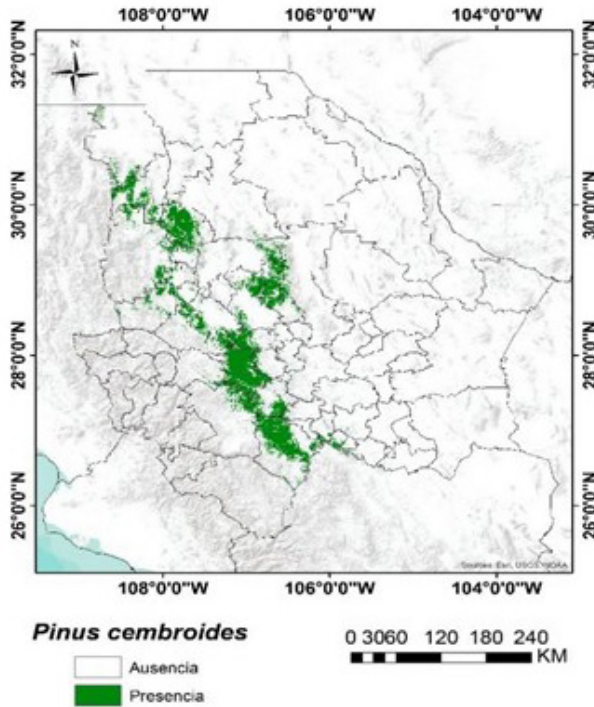
**Figura 15.** Jackknife del AUC para la especie *Pinus cembroides*



**Fuente:** elaboración propia generada a través de MaxEnt.



Figura 16. Mapa de distribución de la especie *Pinus cembroides* en el estado de Chihuahua



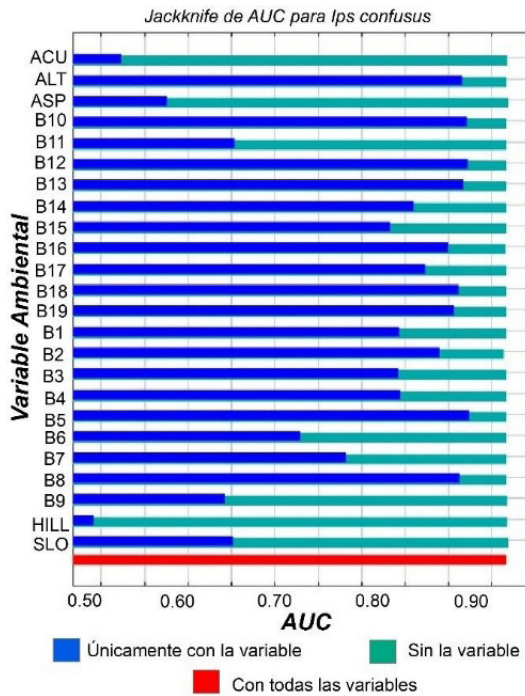
Fuente: elaboración propia.

El método Jackknife muestra la ganancia que genera cada variable en tres diferentes escenarios: en color azul se observa el modelo con una sola variable; en color verde, con todas las variables excepto una; y en color rojo, todas las variables. Es utilizado para reflejar cuánta información útil contiene cada variable. Dentro del eje X es la ganancia, mientras que en el eje Y es la variable (barras verdes: sin la variable; barras azules: solo con la variable; barras rojas: todas las variables; figuras 15 y 17). Posteriormente, se realizó la modelación del nicho ecológico para el descortezador *Ips confusus*, con dieciocho registros de presencia. La distribución espacial se muestra en la Figura 18, y comparada con los puntos de ocurrencia proporcionados por la Conafor, coincide con las áreas donde se

ha presentado esta plaga a partir del año 2012, principalmente en los municipios de Balleza, Carichí y Cusihuirachi.

El modelo para la plaga presenta una fiabilidad promedio de 0.991. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado de la plaga del descortezador fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO 10) con 22.8 %, seguida de la precipitación del trimestre más cálido (BIO 18) con 13.4 % y, por último, la precipitación anual (BIO 12) con 10.8 % de contribución al modelado.

**Figura 17.** Jackknife del AUC para la especie *Ips confusus*



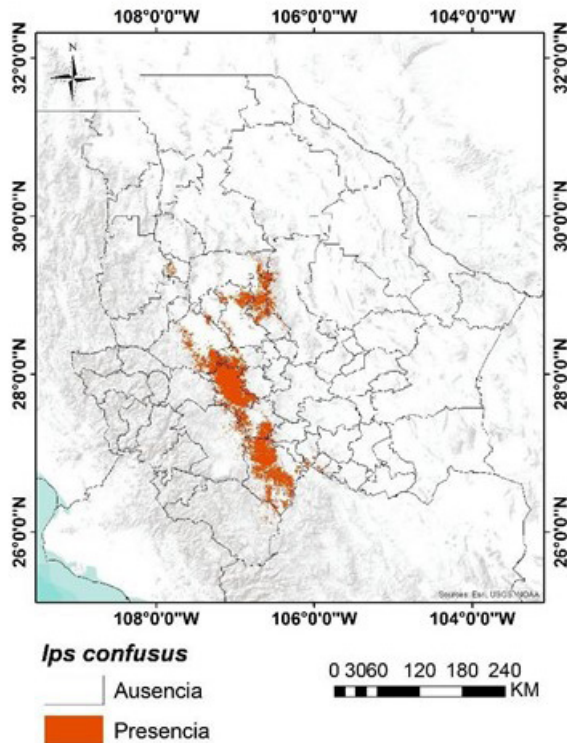
**Fuente:** elaboración propia generada a través de MaxEnt.

Podemos encontrar diferencias entre el modelado de las especies; por ejemplo, para el pino la altura en la que se encuentre es más considerable, además de la precipitación media anual y la temperatura media del trimestre más seco; en cambio, para la plaga son más significativas

variables como la temperatura y la precipitación. Se encontraron datos similares a los establecidos en la correlación de variables climáticas con la actividad vegetal, es decir, el pino puede verse afectado por temperaturas extremas o por déficit hídrico entrando en una etapa de vulnerabilidad; en cambio, la plaga necesita que dichas temperaturas sean un poco más cálidas para poder establecerse.

Los modelos generados se ven influenciados de manera considerable por los puntos de presencia empleados, lo cual es una de las limitantes que se presentan, aunque MaxEnt puede generar resultados de manera confiable con pocos puntos de registro.

**Figura 18.** Mapa de distribución de la especie del descortezador *Ips confusus* en el estado de Chihuahua



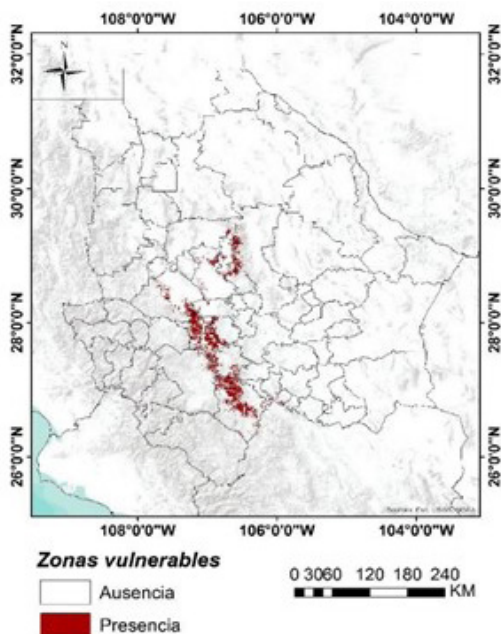
Fuente: elaboración propia.

## IDENTIFICACIÓN DE ZONAS VULNERABLES (REGIONES DONDE EXISTE COINCIDENCIA DE LA ESPECIE DE PINO Y PLAGA) PARA EL ESTADO DE CHIHUAHUA

Con las modelaciones generadas para obtener el nicho ecológico de cada especie de interés (*Ips confusus* y *Pinus cembroides*), se pudieron establecer las zonas donde la presencia y ocurrencia de ambas coinciden. Además, para encontrar las áreas más vulnerables se hizo un cruce del mapa anterior con la serie V del Inegi, mapa de coberturas y uso del suelo, de donde previamente fueron seleccionadas las coberturas de pino para eliminar las regiones de presencia de plaga que se encontraban en zonas que no corresponden a su distribución, por ejemplo, en agricultura o pastizales.

La Figura 19 muestra las zonas vulnerables con las condiciones más idóneas para el esparcimiento de la plaga, con probabilidad de presencia en doce municipios: Balleza, Carichí, Chihuahua, Cuauhtémoc, Cusihuiachi, Guachochi, Guerrero, Namiquipa, Nonoava, Riva Palacio, San Francisco de Borja y San Francisco del Oro. En comparación con los modelos de nicho ecológico generados anteriormente, este mapa final presenta con un elevado nivel de certidumbre las áreas consideradas donde la especie de *Ips confusus* puede afectar al pino piñonero, es decir, un total de 4195 km<sup>2</sup> presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga, y en cierta medida algunas de esas áreas ya fueron afectadas, como en los municipios de Balleza y Carichí en mayor extensión.

**Figura 19.** Mapa de distribución potencial del descortezador *Ips confusus* en el bosque de pino piñonero en el estado de Chihuahua



**Fuente:** elaboración propia.

## Discusión

De acuerdo con los resultados del análisis de las series temporal del NDVI y variables climáticas (anuales), de 2000 a 2014, se pudo comprobar que dicho ciclo estuvo afectado por condiciones irregulares del clima, tanto en precipitación como en temperaturas. A partir de ello, las regiones de pino pueden presentar afectaciones en su fenología y encontrarse en etapa de estrés y debilidad, y es en este momento cuando la plaga del descortezador aprovecha para atacar, alojándose en la corteza para posteriormente secar el pino. Se confirmó lo ya antes visto en otras regiones del país, donde la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas, factores que debilitan a los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar *et al.*, 2013).

Ahora bien, de acuerdo con el análisis de la regresión del NDVI contra las variables climáticas, se encontró una correlación negativa entre la variabilidad del NDVI, del pino seco, con las covariables de temperatura máxima en los tres meses previos y el tiempo transcurrido. Estos resultados son contrarios a lo observado en otros estudios (Alatorre *et al.*, 2015), en donde un clima más cálido en la primavera ha favorecido en la región central de Chihuahua un incremento en los valores medios del NDVI en algunas categorías vegetales, como producto de un adelantamiento del periodo fenológico de la vegetación. En este caso, si tomamos en cuenta lo observado en el apartado anterior, donde la región ha venido padeciendo una sequía prolongada en los últimos años, un incremento en la temperatura podría estar afectando las tasas de evapotranspiración y las funciones de la fotosíntesis (FAO, 2002), lo cual indudablemente vulneró el vigor de la vegetación (estrés hídrico) exponiéndola al ataque del descortezador, ya que el ataque en masa de esta plaga provoca la muerte del hospedero, además de que pueden atacar árboles vivos que deben encontrarse muy debilitados y con diferentes insuficiencias para detener el ataque (Camacho, 2012).

El análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, realizado pixel a pixel para evaluar los procesos de recuperación y degradación en la cubierta vegetal, demuestra que la mayoría de la superficie ha permanecido sin tendencia en condiciones estables. La cubierta analizada y de mayor interés es la región de pino seco, la cual no presenta ninguna recuperación; en cambio, sí se encontró que otras coberturas en el área también presentan pérdida en su actividad vegetal: se trata del pino, pino-encino y pastizal, con un total de 17.5 ha, esta pérdida puede atribuirse a otros posibles factores de influencia en la región, como pueden ser el sobrepastoreo y la extracción de leña, principalmente.

Por otra parte, los resultados de la modelación del nicho ecológico para la especie de *Pinus cembroides* y el descortezador *Ips confusus*, a través del software MaxEnt, permitió demostrar que a diferencia del pino piñonero, el descortezador *Ips confusus* necesita de condiciones que se relacionan más con la temperatura y la precipitación, mientras que la altitud no es uno de los principales factores para su dispersión, pero sí es fundamental. En el caso de la plaga deben ser analizados más a deta-

lle las características de dispersión, ya que es posible agregar variables como la población y vías de comunicación, que pueden ser factores para propagar la expansión de la plaga.

Finalmente, la identificación de zonas vulnerables (regiones donde existen coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua permitió encontrar varios municipios con áreas donde las condiciones pueden favorecer la presencia del descortezador *Ips confusus*. Aunque estas cartografías se generaron a una escala mayor, equivalente a un kilómetro por pixel, se demuestra que toda el área forestal de la colonia Chupaderos, en el municipio de Cuauhtémoc, cuenta con las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

## Conclusiones

La utilización de imágenes del satélite Landsat para obtener información espectral para la elaboración del mapa de coberturas y uso de suelo, más la inclusión del NDVI dentro de las firmas espectrales de cada una de las categorías, ayudó a mejorar considerablemente la separabilidad espectral de las cubiertas presentes en el área de estudio; además, también permitió identificar las áreas donde la especie de pino piñonero se encuentra afectado por la plaga de descortezadores, con un área aproximada de 95 ha afectadas.

Posteriormente, el análisis y la comparación temporal del comportamiento de variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, además del NDVI, tanto de forma estacional como anual durante 14 años, logró destacar las diferencias entre las series comparadas. Existieron eventos climáticos que afectaron la actividad vegetal, ya que los inviernos han sido más cálidos, lo que puede explicar la aparición de los descortezadores; asimismo, la precipitación anual disminuyó en los últimos cinco años, lo que permite que los pinos entren en un estrés hídrico y se encuentren vulnerables.

La serie temporal del NDVI demostró que la actividad fotosintética del pino piñonero comenzó a disminuir a partir del año 2011 en el área analizada, mientras que otras coberturas presentaban valores normales de vegetación.

En el análisis estadístico de regresión multivariante, se encontró que la temperatura de los tres meses previos y el tiempo son las variables que determinan la pérdida de la vegetación. El análisis Mann-Kendall ratificó lo generado en la cartografía de cobertura y uso de suelo, al comparar pixel a pixel en la serie temporal del NDVI las áreas que presentan ganancia, pérdida y estabilidad de la vegetación.

En relación con las modelaciones de nicho ecológico con MaxEnt, es un acercamiento para mostrar las áreas potenciales de distribución de las especies del pino piñonero y el descortezador *Ips confusus*. Las variables ambientales y topográficas son determinantes para la presencia de una especie. En los casos analizados, la temperatura, la precipitación y la altura son las variables que más influyen, calculando un total de 4195 km<sup>2</sup> que presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

Los SIG y sistemas de percepción remota son de gran utilidad para el manejo de datos, además de su interpretación. Este tipo de metodologías de reciente creación permite tomar medidas de prevención y generar planes para controlar y monitorear los problemas forestales en la actualidad; además, la información generada muestra las evidencias necesarias para que instituciones gubernamentales como la Conafor aporten recursos para la reforestación de los bosques.

Los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente. Con la información generada y los análisis efectuados, se confirmó la hipótesis, ya que una serie temporal del NDVI sí permite observar las variaciones de la actividad vegetal, en el caso específico del bosque piñonero para la región central del estado de Chihuahua.

Llevar a cabo análisis a escala detallada en un área pequeña y específica, como en el caso de la colonia Chupaderos en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, permitió mostrar variaciones con más efectividad, en comparación con trabajos realizados a escala municipal o regional.

## Conclusiones generales

En la presente compilación, se han expuesto trabajos en donde se han obtenido resultados que permiten analizar el territorio desde el punto de vista geográfico y espacial. Mediante el uso y la aplicación de herra-



mientas geotecnológicas de los SIG y sistemas de percepción remota, así como de algoritmos de predicción, como MaxEnt, además de variables edafoclimáticas, topográficas, etcétera, es posible determinar zonas de interés para la protección de la flora y la fauna; aunado al análisis de la distribución potencial de las especies sobre corredores biológicos en el territorio, esto ofrece a los tomadores de decisiones una percepción geoespacial de su comportamiento, permitiéndoles tomar las mejores alternativas para el cuidado, monitoreo y conservación de las especies en riesgo o en peligro de extinción.

Por otro lado, la combinación de estas técnicas, algoritmos y herramientas de geoprocésamiento de imágenes de satélite permiten obtener análisis multitemporales del territorio, así como generar el comportamiento espectral y fenológico de la vegetación. La aplicación de estos métodos y geoprocésos mediante herramientas de SIG son de gran utilidad cuando se es necesario analizar el daño provocado por plagas sobre una cobertura forestal durante un periodo; se obtienen así resultados del dosel verdor de la vegetación y su respuesta espectral modificada por los daños de los insectos. Asimismo, es posible determinar las zonas de la distribución potencial y de traslape de ciertas especies forestales que podrán ser atacadas por estos organismos, ayudando a analizar las regiones en el territorio que podrían ser reforestadas y que, a la vez, estarían en riesgo por alguna plaga.

Dentro del análisis del territorio es relevante saber identificar zonas potenciales de reforestación; técnicas como la agroforestería son empleadas para la conservación de las especies de la flora y la fauna, ayudando a la conservación del territorio. El uso de SIG, procesamiento de imágenes satelitales y algoritmos de distribución potencial, como MaxEnt, son de vital importancia cuando se requiere aplicar técnicas de reforestación. El apoyo que ofrecen estas nuevas tecnologías es generar resultados en donde es posible identificar las áreas con las condiciones óptimas y adecuadas para el desarrollo biológico de las especies endémicas para la reforestación.

La aplicación de métodos, herramientas geotecnológicas y técnicas de geoprocésamiento han sido importantes en los últimos años en el sector salud, por lo que comprender y predecir cómo se distribuyen vec-

tores de transmisión de enfermedades en el territorio y espacio geográfico es de gran ayuda, debido a que es posible determinar las regiones que cumplen con las condiciones ambientales óptimas para que se desarrollen estos organismos, así como obtener y predecir la población que se encuentra en riesgo de la transmisión de enfermedades por dichos vectores.

Finalmente, en las últimas décadas, la aplicación del GPS, sensores remotos y SIG en el estudio de los ecosistemas ha hecho posible que la geoinformática se convierta en una herramienta clave en estudios relacionados con la biogeografía. Por ejemplo, las aportaciones de la geoinformática en estudios de biodiversidad han facilitado la implementación de las acciones dirigidas a la conservación o recuperación de las especies. Las relaciones espaciales en los estudios relacionados con la biogeografía se han convertido en algo indispensable; prueba de ello, es que programas como ArcGIS, QGIS y la suite estadística R han desarrollado he implementado módulos específicos para el estudio de patrones y geoestadística para el estudio de esta rama de las ciencias naturales.

## Literatura citada

- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos*, 165, 7-27.
- Alatorre, L. C., Miramontes, S., García, A. K., Díaz, R., & Bravo, L. C. (2014). Evolución de la dinámica vegetal mediante una serie de imágenes Landsat TM (1986-2011): región central de Chihuahua, México. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 449-476.
- Alatorre, L. C., Sánchez, E., Amado, J. P., Wiebe, L. C., Torres, M. E., Rojas, H. L., Bravo, L. C., & López, E. (2015). Analysis of the temporal and spatial evolution of recovery and degradation processes in vegetated areas using a time series of Landsat TM images (1986-2011): Central region of Chihuahua, México. *Open Journal of Forestry*, 5(2), 162-180.
- Brizuela, A., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. En Martín (ed.), *Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 201-214). Recuperado de <https://>

- docplayer.es/44560678-Aplicacion-de-metodos-de-correccion-atmosferica-de-datos-landsat-5-para-analisis-multitemporal.html
- Camacho, A. (2012). *El género Ips (coleóptera: Curculionidae: Scolytinae) en México* (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados-Laboratorio de Entomología Forestal. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10521/1682>
- Ceroni, M., Achkar, M., & Gazzano, I. (2013). Evolución temporal del NDVI en Uruguay mediante imágenes SPOT en el periodo 1998-2012. En el XVI Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto, Brasil, (pp. 1314-1321).
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10, 1-9.
- Cibrián, D., Méndez, J. T., Campos, R. Yates, H. O., & Flores, J. E. (1995). Tres especies del género *Dendroctonus* encontradas en México. En *Insectos forestales de México* (pp. 269-285). México: Universidad Autónoma de Chapingo/Comisión Forestal de América del Norte.
- Comisión Nacional de Biodiversidad (Conabio) (2014a). Nichos y áreas de distribución. Recuperado de <http://nicho.conabio.gob.mx/lacalibracion-del-modelo/maxent>
- (2014b). *Pinus cembroides* Zucc. Recuperado de [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/54-pinacl1m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/54-pinacl1m.pdf)
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2011). *Pinus cembroides* Zucc. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf>
- (2014). Base de datos: predios afectados por *Ips confusus*, Chihuahua, México. Departamento de Sanidad Forestal, Gerencia Estatal de la Comisión Nacional Forestal. Chihuahua, Chih. (4 de octubre de 2014)
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46.
- Cuéllar, G., Equihua, A., Villa, J., Estrada, E. G., Méndez, T., & Romero, J. (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides*

- des Zucc. atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 42-49.
- Fierro, C. D., Torres, M. E., Alatorre, L. C., & Rojas, H. L. (2013). Modelado de nicho ecológico para la predicción del área de distribución actual y potencial del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el estado de Chihuahua. En L. Alatorre, M. Torres, H. Rojas, L. Bravo, L. Wiebe, F. Sandoval, & E. López (coords), *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: teledetección y sistemas de información geográfica* (pp. 369-387). Ciudad Juárez: UACJ.
- Flores, J. D., Nájera, J. A., & Morales, L. (2003). Principales plagas de los pinos piñoneros en el sur de Coahuila. Recuperado de <http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/recforestales/plagapino.pdf>
- García, A. K. (2014). Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut. En L. Bravo, & L. Alatorre (coords.), *Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas. Clima, recursos hídricos, vulnerabilidad social y deforestación* (pp. 9-31). Ciudad Juárez: UACJ.
- García, S. E., & Cibrián, D. (2011). Pudrición de raíz causada por *Fusarium oxysporum* Schltdl. en coníferas. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, 204-207. Colegio de Postgraduados, Oaxaca, México.
- Gómez, M. K. (2005). Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales. Universidad de Piura. Recuperado de <http://infobosques.com/portal/biblioteca/indice-de-vegetacion-en-areas-del-bosque-seco-del-noroeste-del-peru-a-partir-de-imagenes-satelitales/>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- IDRISI (2014). MAXLIKE: IDRISI Selva Help System.
- Iglesias, M. R., Barchuk, A., & Grilli, M. P. (2010). Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección*, 34, 44-54.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2014). Imágenes del territorio: Landsat. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Landsat.aspx>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed) (2014). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, estado de Chihuahua. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM08chihuahua/municipios/08017a.html>
- Loya, J. O., Aguilar, S., Fierro, C. D., Legarreta, C. K., Bencomo, J. A., & Alatorre, L. C. (2012). Análisis de la separabilidad espectral de cultivos agrícolas en imágenes del sensor Landsat TM para la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México. En J. Mas, & G. Cuevas, *Memorias del Congreso XIX Simposio Nacional Selper-México* (pp. 43-48). México: UNAM.
- Maldonado, J. D., Moreno, L. J., & Alatorre, L. C. (2013). Evaluación de la pérdida de *Pinus cembroides* aplicando teledetección y SIG: caso de estudio en la zona noroeste del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. *Memorias de la XX Reunión Nacional de Selper-México*.
- Medina, R. J., & Miramontes, S. (2014). *Análisis de la evolución temporal de la actividad vegetal en áreas de manglar (1990-2010): deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y río Fuerte en Sinaloa, México* (Tesis de licenciatura). UACJ. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11961/2064>
- Mendoza, A., Cibrián, D. & García, S. E. (2011). *Phytophthora cinnamomi* Rands. y *Fusarium oxysporum* Schltdl. como agentes causales de pudrición de raíz en *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Mayr) Franco. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, 191-195.
- Meneses, C. L. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva, Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*, 238, 39-46.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distribution: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Ojeda, A. (2010). Ficha del *Ips confusus*. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/15/1443Ips%20confusus.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.html>
- Pérez, G. (2014). *Análisis de fragmentación de hábitat con base en la distribución potencial del águila real (Aquila chrysaetos) en Chihuahua, México* (Tesis de licenciatura). UACJ. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11961/1746>
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green Wave effect) of natural vegetation*. NASA/GSFC. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740004927.pdf>
- Santana, M. V., Rosales, E. M., Manzano, L. R., Santana, G., & Pineda, N. B. (2013). Las geotecnologías en la construcción de ciudades saludables: zona metropolitana de Toluca, México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (Geosig)*, 5, 64-95.
- Secretaría de Marina (Semar) (2012). Recuperado de <http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html>
- WorldClim (2014). Bioclim. Recuperado de <http://worldclim.org/bioclim>