

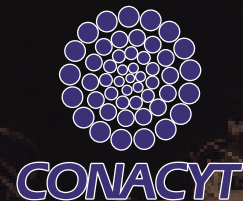


Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México

Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México



Fondo
CONACYT
CONAFOR

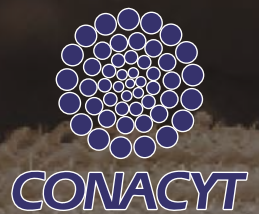




Fondo
CONACYT
CONAFOR



COMISIÓN NACIONAL FORESTAL



Variabilidad climática e interacción con otros factores que afectan la dinámica poblacional de descortezadores en bosques amenazados de México

Proyecto de investigación financiado por el Fondo Sectorial CONAFOR-CONACyT-2014, C01-234547
ISBN: 978-607-513-336-2

Dr. Víctor Hugo Cambrón Sandoval
Dr. Jorge Méndez González
M. en C. María Concepción Ledesma Colunga
M. en G. Hugo Luna Soria
Dr. Mario Alberto García Aranda
Dr. Julián Cerano Paredes
M. en C. Javier Alejandro Obregón Zúñiga
Dr. Santiago Vergara Pineda

Querétaro, Qro. enero 2018

Prólogo

El presente trabajo representa el esfuerzo conjunto de la Comisión Nacional Forestal, El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal, diversas instituciones de educación superior y de personas involucradas en el estudio y conservación de los bosques de México.

Tomando en cuenta el valor ecológico, social y económico, de los bosques templados en México y el impacto de las plagas en la conservación de estos ecosistemas, la Comisión Nacional Forestal, implementó un sistema de monitoreo por un periodo de dos años, de insectos descortezadores en 11 estados de la República Mexicana, analizando el entorno biótico y abiótico, que permitiera explicar la presencia o ausencia de las poblaciones de insectos descortezadores en sitios prioritarios y de esta forma conocer el comportamiento actual y predecir el futuro de dichas poblaciones. Este estudio permite determinar áreas de riesgo y con esto planificar mejores estrategias en el manejo integral de los bosques.

El trabajo incluyó métodos tradicionales de monitoreo de insectos descortezadores, asimismo se integraron nuevas técnicas como la dendrocronología y la modelación de insectos descortezadores mediante Sistemas de información Geográfica y Geo-estadística. Al incluir variables climáticas, dasométricas y topográficas, se observa que variables como diámetro de copa, área basal y número de especies, también son importantes para modelar la distribución de esta plaga.

Con los resultados del estudio, es posible observar que los modelos de distribución potencial a futuro indican un cambio importante en el rango de distribución de las especies de *Dendroctonus* spp. Sin embargo, es necesario considerar que, como resultado del cambio climático, se prevé una disminución en la cobertura de los bosques. Se puede asumir entonces que bajo los modelos probados, se mantienen las mismas proporciones de ocurrencia, simplemente el área de la cobertura vegetal en los escenarios futuros es menor, en comparación con el escenario actual.

Los autores de la presente obra, se han esforzado en obtener resultados que logren ser de utilidad en la parte operativa, por esa razón es necesario sumar el compromiso por parte de todos los involucrados para planificar de forma conjunta acciones y planes de manejo a favor de garantizar la conservación de nuestros bosques, contribuyendo a mejorar las condiciones para nuestras futuras generaciones.

Abel Plascencia González
Gerente de Sanidad Forestal
Comisión Nacional Forestal

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 9

2. METODOLOGÍA 11

	11	13	14
	2.1 Áreas de estudio	2.2 Trampeo de insectos descortezadores	2.3 Obtención de datos climáticos en el sitio
14	15	15	16
2.4 Obtención de datos de parcelas del sitio	2.5 Identificación de insectos descortezadores	2.5.1 Identificación de estructuras externas	2.6 Montado de insectos descortezadores
16	17	17	19
2.7 Técnicas Dendrocronológicas	2.7.1 Toma y preparación de muestras	2.7.2 Fechado y estandarización de las series	2.8 Generación de modelos de distribución de descortezadores
19	19	19	20
2.8.1 Fuente de datos climáticos	2.8.2 Generación de superficies climáticas	2.8.3 Generación de superficies biológicas	2.8.4 Modelación de la distribución actual y futura de descortezadores

3. RESULTADOS 21

	21	24	25			
	3.1 Especies de descortezadores por área de estudio	3.2 Fluctuación temporal y altitudinal promedio de descortezadores	3.2.1 Chihuahua			
28	31	33	36	38	41	44
3.2.2 Querétaro	3.2.3 Durango	3.2.4 Hidalgo	3.2.5 Nuevo León	3.2.6 Jalisco	3.2.7 Oaxaca	3.2.8 Coahuila
47	47	51	53	58	62	
3.2.9 Chiapas	3.2.10 Estado de México	3.2.11 Michoacán	3.3 Identificación de descortezadores (genitalias)	3.4 Relación dendrocronología con descortezadores	3.5 Mapas de distribución potencial del género <i>Dendroctonus</i> spp.	
64	67					
3.6 Modelos de distribución actual de descortezadores en México	3.7 Modelos de proyección de distribución futura de descortezadores en México					

4. CONCLUSIONES 69

5. BIBLIOGRAFÍA 70

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio general, se indican los 11 estados que abarcó el proyecto de monitoreo de descortezadores. 1) Chihuahua, 2) Durango, 3) Coahuila, 4) Nuevo León, 5) Jalisco, 6) Michoacán, 7) Querétaro, 8) Hidalgo, 9) Estado de México, 10) Oaxaca y 11) Chiapas.	11
Figura 2. Área de estudio que incluye la ubicación geográfica específica de las trampas de monitoreo de descortezadores.	13
Figura 3. Abundancia por especie de descortezador por sitios de estudio.	21
Figura 4. Abundancia por especie de descortezador por sitios de algunos estados de la República Mexicana (sitios con densidades de captura superiores a 50 mil individuos).	22
Figura 5. Abundancia por especie de descortezador por sitios estado de la República Mexicana (sitios con densidades de captura menores a 50 mil individuos).	23
Figura 6. Abundancia por especie asociadas a descortezador por sitios de estudio.	24
Figura 7. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Chihuahua.	26
Figura 8. Abundancia espacial por especie de descortezador para el sitio de Chihuahua.	28
Figura 9. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Querétaro.	29
Figura 10. Abundancia altitudinal por especie de descortezador para el sitio de Querétaro	30
Figura 11. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Durango.	32
Figura 12. Abundancia altitudinal por especie de descortezador para el sitio de Durango.	33
Figura 13. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio1 Zimapán, en el Estado de Hidalgo.	34
Figura 14. Abundancia altitudinal por especie el sitio1 Zimapán, en el Estado de Hidalgo.	35
Figura 15. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Nuevo León.	37
Figura 16. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Nuevo León.	38
Figura 17. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Jalisco.	40
Figura 18. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Jalisco.	41
Figura 19. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Oaxaca. 43	40
Figura 20. Abundancia espacial por especie para el Estado de Oaxaca. 44	41

Figura 21.	Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Coahuila.	45
Figura 22.	Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Coahuila.	46
Figura 23.	Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Chiapas.	47
Figura 24.	Abundancia espacial por especie para el Estado de Chiapas.	48
Figura 25.	Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de México.	49
Figura 26.	Abundancia espacial por especie para el Estado de México.	50
Figura 27.	Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para los sitios 1 y 2 de Nuevo San Juan Parangaricutiro, en el Estado de Michoacán.	52
Figura 28.	Abundancia altitudinal por especie para los sitios 1 y 2 de Nuevo San Juan Parangaricutiro, en el Estado de Michoacán.	53
Figura 29.	Series dendrocronológicas generadas en diferentes especies de coníferas, en sitios específicos (Figura 2) de varios estados en que se muestreó insectos descortezadores.	59
Figura 30.	Distribución geográfica de descortezadores (2007 - 2016) en México en los últimos 10 años.	60
Figura 31.	Número de registros de descortezadores <i>Dendroctonus</i> spp., acorde a información del inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2009 - 2014.	62
Figura 32.	Distribución geográfica de registros de <i>Dendroctonus</i> spp., en México (Inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2009 - 2014).	65
Figura 33.	Modelo de distribución potencial actual de <i>Dendroctonus</i> spp., en México, utilizando 30 variables climáticas (Acotado a zona de bosque).	65
Figura 34.	Modelo de distribución potencial actual de <i>Dendroctonus</i> spp., en México, utilizando variables dasométricas.	66
Figura 35.	Modelo de distribución potencial actual de <i>Dendroctonus</i> spp., en México, utilizando variables climáticas, dasométricas y topográficas.	66
Figura 36.	Modelo de riesgo de <i>Dendroctonus</i> spp., en México. Valores más altos indican mayor riesgo por ataque de descortezadores.	66
Figura 37.	Modelo de distribución potencial actual de <i>Dendroctonus</i> spp., en México, utilizando 19 variables Bioclim.	67
Figura 38.	Proyección de la distribución potencial de <i>Dendroctonus</i> spp., en 2050 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP45.	68
Figura 39.	Proyección de la distribución potencial de <i>Dendroctonus</i> spp., en 2070 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP45.	68
Figura 40.	Proyección de la distribución potencial de <i>Dendroctonus</i> spp., en 2050 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP85.	68
Figura 41.	Proyección de la distribución potencial de <i>Dendroctonus</i> spp., en 2070 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP85.	68

Índice de fotografías

Fotografía 1

Trampa tipo Lindgren® de ocho unidades utilizada en el monitoreo de insectos descortezadores.

Fotografía 2

Obtención de muestras (virutas) de árboles vivos (a, b y c) y corte de secciones transversales de árboles muertos (d) para su análisis mediante técnicas dendrocronológicas.

Fotografía 3

Anillos anuales de crecimiento de *Pinus hartwegii* posterior al proceso de pulido, permitiendo definir la similitud en los patrones de crecimiento, identificar anillos perdidos y falsos, y con ello obtener un fechado exacto de la muestra.

Fotografía 4

Vista lateral izquierda de ejemplar de la especie *D. frontalis*.

Fotografía 5

Vista lateral izquierda de ejemplar de la especie *D. mexicanus*.

Fotografía 6

Vista dorso-lateral del declive elitral de *D. frontalis*.

Fotografía 7

Vista postero-lateral del declive elitral de *D. mexicanus*.

Fotografía 8

Patrón y tamaño de setas del declive elitral (setas cortas y largas en los espacios interestriales 1 a 3) de *D. frontalis*.

Fotografía 9

Patrón y tamaño de setas del declive elitral (setas cortas, medianas y largas en los espacios interestriales 1 a 3) de *D. mexicanus*.

Fotografía 10

Vista de la región antero-lateral del pronoto y la cabeza de *D. frontalis*.

Fotografía 11

Vista de la región antero-lateral del pronoto de cabeza de *D. mexicanus*.

Fotografía 12

Vista frontal de la cabeza de *D. frontalis*, que muestra gránulos y tubérculos prominentes separados por la ranura frontal.

Fotografía 13

Vista frontal de la cabeza de *D. mexicanus* que muestra prominentes tubérculos laterales separados por la ranura frontal.

Fotografía 14

Vista frontal de *D. frontalis*, que muestra la superficie por encima de los ojos escasamente granulada.

Fotografía 15

Vista frontal de *D. mexicanus*, que muestra la superficie por encima de los ojos puntuada y rugosa.

Fotografía 16

Conducto seminal de *D. mexicanus* colectado en el estado de Oaxaca. Proceso ventral (vp), proceso dorsal (ps), válvula seminal (vs).

Fotografía 17

Conducto seminal de *D. frontalis* colectado en el estado de Hidalgo. Proceso ventral (vp), proceso dorsal (ps), válvula seminal (vs).

Índice de tablas

Tabla 1.

Longitud de series dendrocronológicas generadas en los diferentes estados.

58

Tabla 2.

Registros históricos de plagas por insectos descortezadores en México.

61

Tabla 3.

Contribución de variables climáticas, dasométricas y topográficas en la generación de modelos de distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en México.

63

Tabla 4.

Rango de valores de variables climáticas, dasométricas y topográficas que determinan la distribución de descortezadores en México.

64

1. Introducción



En México, el género *Pinus* tiene gran importancia ecológica, económica y social, es fuente de madera, leña, pulpa, resina y semillas, sustenta la industria forestal y proporciona servicios ambientales, además influye en el clima regional (Ramírez - Herrera *et al.*, 2005; Sánchez - González, 2008). El cambio en el clima global está induciendo modificaciones en la dinámica poblacional de especies de flora, y de algunas poblaciones de insectos; el aumento de la temperatura global es ya de 0.85 °C (IPCC, 2013) su impacto se ha reflejado en la redistribución de varias especies (Parmesan, 2006). Específicamente, temperatura y precipitación están relacionadas a fluctuaciones poblacionales de las plagas forestales (Kocmánková *et al.*, 2010), tal es el caso de especies del género *Dendroctonus* o descortezadores, de la familia Curculionidae y subfamilia Scolytinae, cuya tendencia es ampliar el intervalo altitudinal del hábitat; sin embargo, las predicciones

actuales son erráticas y se han relacionado a cambios climáticos locales y regionales (Parmesan, 2006).

Los insectos descortezadores del género *Dendroctonus* juegan un papel ecológico importante en la dinámica natural de los bosques de coníferas, dado que ayudan a regular la estructura y composición de las especies vegetales (Carroll *et al.*, 2003), no obstante, en los últimos años han afectado miles de hectáreas de bosques de coníferas en todo el mundo (Macías-Sámano y Niño, 2016). En México, *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann se consideran las especies de plagas más importantes (Sánchez y Torres, 2007; Cuéllar-Rodríguez *et al.*, 2013; Armendáriz-Toledano *et al.*, 2014), incluso coexisten sobre un mismo hospedero (Zúñiga *et al.*, 1995). La primera posee la mayor distribución geográfica y altitudinal, con mayor número de huéspedes, mientras que *D. frontalis* se distribuye donde otras especies tienen distribuciones restringidas (Salinas *et al.*, 2010).

Ante el desconocimiento de la dinámica poblacional de insectos descortezadores en los bosques de coníferas de México, mediante el apoyo del fondo sectorial CONAFOR - CONACYT se han establecido redes de monitoreo en diversas regiones forestales donde se evalúa su abundancia y distribución poblacional en diferentes niveles altitudinales y su relación al clima local y a las variables del rodal. El monitoreo es un procedimiento primordial, ya que con ello se puede inferir su abundancia, causas - efectos y definir si se trata de una plaga y la necesidad o no, de proceder al control de la misma, pero también es una forma de predecir el comportamiento futuro, permitiendo planificar mejores estrategias de manejo integral de los bosques.

2. Metodología

2.1 Áreas de estudio

El estudio se realizó en 11 estados del país, específicamente como se indica a continuación: estado (municipio; altitud): a) zona norte: Chihuahua (Bocoyna; de 2,360 a 2,648 msnm), Durango (San Dimas; de 2,300 a 2,600 msnm), Nuevo León (Santiago-PNCM; de 1,950 a 2,650 msnm) y Coahuila (Arteaga; de 2,650 a 3,350 msnm); b) zona centro: Querétaro (Arroyo Seco, Landa de Matamoros y Pinal de Amoles; de 1,589 a 3,058 msnm), Hidalgo (Zimapán, Pacula y San Nicolás; de 1,342 a 2,611 msnm), Michoacán (Cerro Prieto, Copicuaro, La Alberca, El derrumbadero, Pascuala, Rosario y Zirahuen; de 2,104 a 2,889 msnm), Estado de México (Tlalmanalco; de 3,152 a 3,611 msnm) y Jalisco (Tecolotlán; de 2,000 a 2,300 msnm); c) zona sur: Oaxaca (Santa Catarina Lachatao y Santos Reyes Papalo; de 2,113 a 2,899 msnm) y Chiapas (Las Margaritas y Motozintla; de 1,430 a 2,150 msnm) (Figura 1 y 2).



Figura 1. Área de estudio general, se indican los 11 estados que abarcó el proyecto de monitoreo de descortezadores. 1) Chihuahua, 2) Durango, 3) Coahuila, 4) Nuevo León, 5) Jalisco, 6) Michoacán, 7) Querétaro, 8) Hidalgo, 9) Estado de México, 10) Oaxaca y 11) Chiapas.



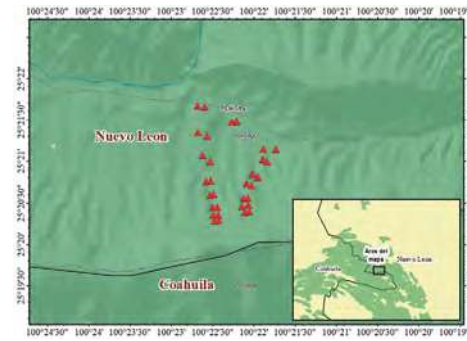
Sitio Chihuahua



Sitio Durango



Sitio Coahuila



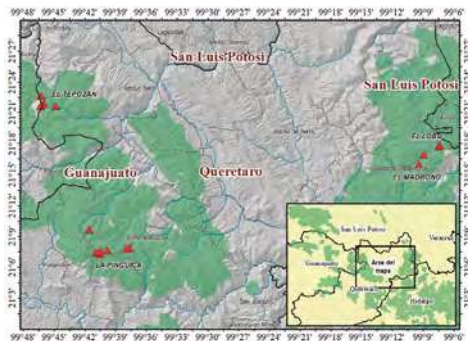
Sitio Nuevo León



Sitio Jalisco



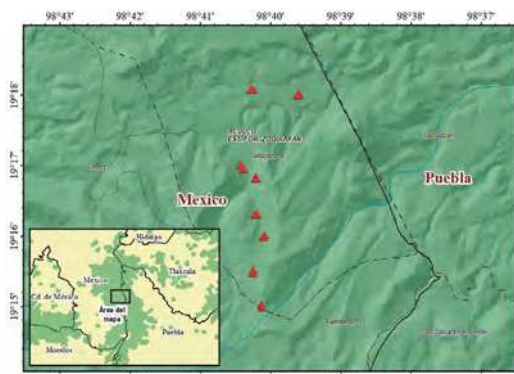
Sitio Michoacán



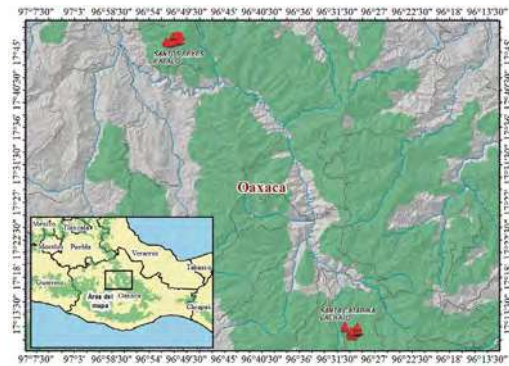
Sitio Querétaro



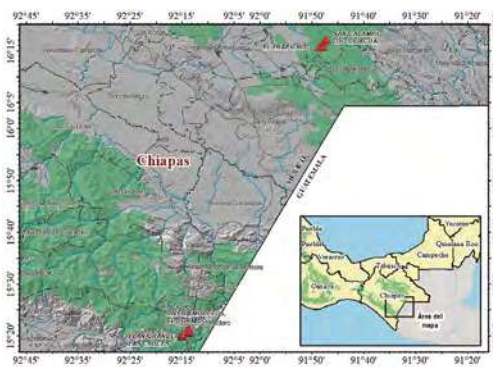
Sitio Hidalgo



Sitio Estado de México



Sitio Oaxaca



Sitio Chiapas

Figura 2. Área de estudio que incluye la ubicación geográfica específica de las trampas de monitoreo de descortezadores.

2.2 Trampeo de insectos descortezadores

El muestreo fue de tipo estratificado, con selección sistemática, dos tratamientos y dos repeticiones por tratamiento. El experimento se estableció sobre laderas con exposición acorde a cada área de estudio, formando dos transectos de muestreo (A y B) separados entre sí por 100 m aproximadamente. Cada transecto se colocó según la altitud de cada área, de ser posible un solo transecto hasta cumplir ocho altitudes, y cuando no fue posible se hicieron subtransectos tratando de abarcar el mayor rango altitudinal.

En un árbol no hospedero de cada altitud se colocó una trampa Lindgren® de ocho embudos, debidamente etiquetada, cebada con feromonas (frontalina, endo-brevicomina y alfa-pineno) y a la par a 50 m de distancia se colocó una trampa testigo (sin atrayente) (Fotografía 1). El vaso colector se ubicó a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo, al cual se le vertió anticongelante marca PRESTONE AF EX para con

servar los insectos en buen estado. El periodo de estudio fue de febrero de 2015 a marzo de 2017, la colecta de insectos se realizó cada 15 días, posteriormente fueron llevados al laboratorio para su identificación a nivel especie con claves taxonómicas (Cibrián *et al.*, 1995) y con la ayuda de un estereoscopio LEICA modelo EZ4.



Fotografía 1. Trampa tipo Lindgren® de ocho unidades utilizada en el monitoreo de insectos descortezadores.

2.3 Obtención de datos climáticos en el sitio

Sobre un árbol cercano a cada trampa, a una altura de aproximadamente 1.5 m del nivel del suelo, se colocó un Data Logger modelo EL-USB-2, programado para registrar cada 30 minutos información de temperatura (°C), humedad relativa (%) y punto de rocío (°C), misma que fue descargada cada tres meses usando el software EasyLogUSB.

2.4 Obtención de datos de parcelas del sitio

Considerando cada trampa como punto central, se delimitó una parcela de forma cuadrada (50 m x 50 m) y haciendo un censo de todo el arbolado existente dentro de esta parcela se registraron las siguientes variables: especie, diámetro normal (cm), altura total del árbol (m), diámetro de copa (m), densidad de cobertura de copa (%), estado fitosanitario (sano e infestado), y del área se obtuvo pendiente (%) y exposición (N, S, E y O). El equipo utilizado para tal fin fue: distanciómetro Leica DISTO™ D810 touch, densiómetro esférico convexo (DSM43), densiómetro esférico cóncavo (DSM43A), forcipula Haglöf Mantax, cinta diamétrica (283D/10M) y GPS Garmin (GPS-MAP 64).

2.5 Identificación de insectos descortezadores

2.5.1 Identificación de estructuras externas

Los insectos colectados se preservaron en alcohol 70 % y en refrigeración hasta el momento de su identificación. Los insectos se deshidrataron previo a su procesamiento de identificación bajo microscopio de disección. Los especímenes con las características más adecuadas y con todos los apéndices, se colocaron en alfileres entomológicos, adheridos a un triángulo de opalina de manera individual con una gota de pegamento blanco en el costado derecho y en posición dorso-ventral. A cada espécimen se le adicionaron los datos de colecta e identificación en el mismo alfiler conforme a lo sugerido por Triplehorn et al. (2005). Se utilizaron las claves de Wood (1982), así como las descripciones indicadas en su libro sobre escolítidos. De igual forma se emplearon las claves de Cibrián *et al.* (1995) durante la labor de identificación, utilizando microscopios de disección LEICA® EZ4 HDaA 35x.

2.5.2 Identificación de estructuras internas (genitalia)

Para corroborar la identificación de las especies *D. mexicanus* y *D. frontalis*, se realizaron laminillas de genitalias de machos. Para ello, fueron retirados los últimos segmentos abdominales y la genitalia fue extraída para pasar por el proceso de macerado en

una solución de KOH al 10 % durante 24 horas, posteriormente se deshidrataron en un tren de alcohol de 70, 80 y 96 %. De las genitalitas deshidratadas se llevó a cabo la extracción de los conductos seminales, los cuales fueron limpiados en aceite de clavo y montados en laminillas, en posición lateral utilizando bálsamo de Canadá y xilol, así mismo, la corroboración de las especies se hizo mediante comparación morfológica de los conductos seminales.

Algunos ejemplares fueron seleccionados para la toma de fotografía en microscopio electrónico de barrido ZEISS® EVO LS15. Para ello, se deshidrataron en alcohol absoluto, y se recubrieron en oro, para ser observados en vista lateral, haciendo énfasis en el declive de los élitros, y también en una vista de la cabeza en posición frontal.

2.6 Montado de insectos descortezadores

Posterior a la identificación taxonómica, algunos ejemplares se integraron a la colección entomológica de la Facultad de Ciencias Naturales en la Universidad Autónoma de Querétaro, para crear un referente del proyecto. Para dicho fin se utilizó la técnica de montura doble (Triplehorn *et al.*, 2005), que consiste en alfileres entomológicos (No. 3) que atraviesan piezas triangulares y alongadas de papel opalina libre de ácido (en forma de gota), en su extremo más ancho, para que en la parte más estrecha se monte el ejemplar en su costado derecho, entre el segundo y tercer par de patas. Lo anterior, con el fin de facilitar la manipulación de los ejemplares para futuras consultas.

2.7 Técnicas Dendrocronológicas

Las técnicas dendrocronológicas se emplearon como una herramienta para desarrollar series climáticas extensas, y analizar cómo la variabilidad climática ha estado relacionada en la presencia de brotes de descortezadores en los bosques de coníferas del país.

2.7.1 Toma y preparación de muestras

Se seleccionaron individuos de la especie de pino más abundante de cada sitio, el muestreo dendrocronológico fue selectivo, de árboles longevos, localizados en suelos pobres y con alta insolación (Villanueva *et al.*, 2015). El muestreo estuvo enfocado a obtener muestras de árboles vivos usando taladros de Pressler de diferentes diámetros y longitudes (Fotografía 2a, 2b y 2c) y secciones transversales de árboles muertos (trozas caídas y tocones) usando motosierra (Fotografía 2d).

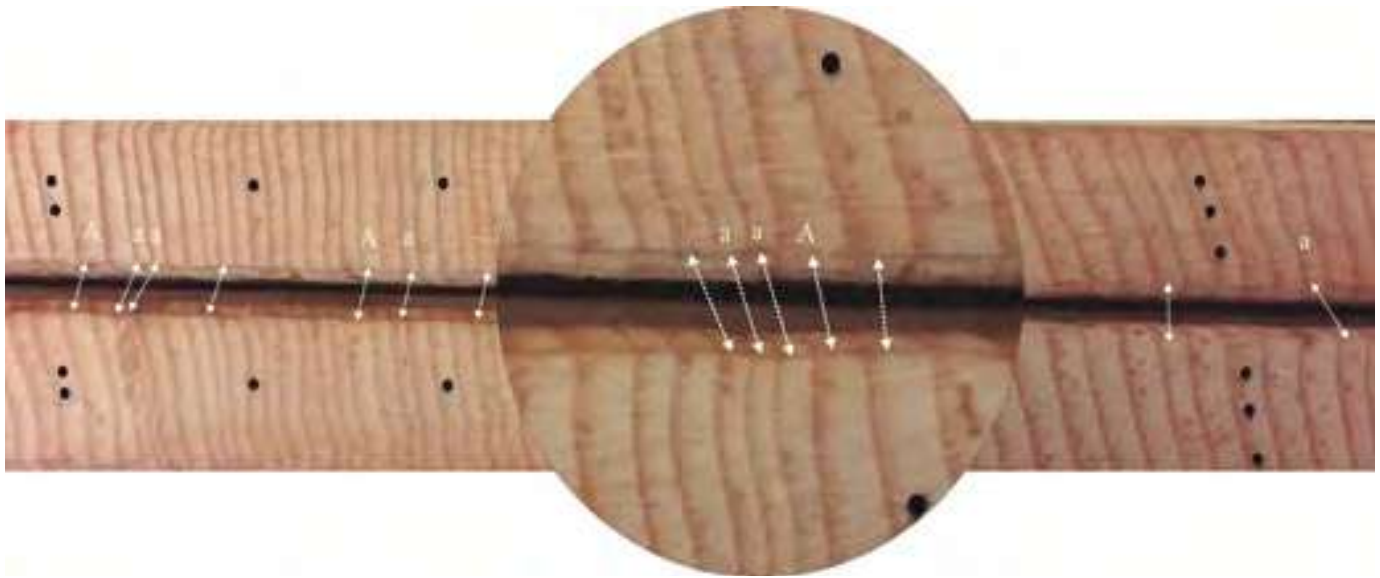


Fotografía 2. Obtención de muestras (virutas) de árboles vivos (a, b y c) y corte de secciones transversales de árboles muertos (d) para su análisis mediante técnicas dendrocronológicas.

2.7.2 Fechado y estandarización de las series

Las muestras, se montaron en molduras de madera, para dar mayor firmeza y resistencia a los núcleos de crecimiento durante el proceso de preparación y fechado. Posteriormente, las virutas se pulieron con lija de granulometría gruesa a fina (de 120 a 1200), para resaltar los anillos de crecimiento (Fotografía 3) (Villanueva *et al.*, 2015). Cada anillo de crecimiento fue fechado al año exacto de su formación mediante la técnica dendrocronológica estándar denominada “fechado cruzado”, con base en la similitud

de patrones de crecimiento obtenidos a partir de un sistema de medición VELMEX, precisión de medición de 0.001 mm, y con el software MeasureJ2X para Windows (Stokes y Smiley, 1968; Soto-Correa *et al.*, 2014). La calidad del fechado se evaluó con el software COFECHA (Holmes, 1983) y la serie estandarizada del índice de ancho de anillo se obtuvo con el software ARSTAN (Cook y Holmes, 1984).



Fotografía 3. Anillos anuales de crecimiento de *Pinus hartwegii* posterior al proceso de pulido, permitiendo definir la similitud en los patrones de crecimiento, identificar anillos perdidos y falsos, y con ello obtener un fechado exacto de la muestra.

2.7.3 Análisis de datos dendrocronológicos

Se generó una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Cook y Holmes, 1984; Fritts, 2001). Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras. El promedio de todas las series estandarizadas permitió generar la cronología final para el área de estudio. Definido el periodo de respuesta climática y los datos climáticos disponibles se genera un modelo de predicción climática del mismo periodo, que posteriormente se calibra y se verifica (Fritts, 1991). Finalmente, se le ajusta una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia, como periodos secos o húmedos (Cook y Peters, 1981).

2.8 Generación de modelos de distribución de descortezadores

2.8.1 Fuente de datos climáticos

Los registros diarios de precipitación (Pp), temperatura máxima (Tx) y mínima (Tn) de 5000 estaciones climatológicas fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional. La serie utilizada varió de 1940 al 2011, la selección de estaciones consideró los siguientes criterios: longitud de registro ≥ 50 años, contener más del 80 % de la información del periodo, consistencia anual e interanual y homogeneidad de las series (Pachauri y Reisinger, 2007). De las estaciones climatológicas totales, únicamente 575 cumplieron estos criterios.

2.8.2 Generación de superficies climáticas

De cada variable (Pp, Tx y Tn) se generaron algunos índices mensuales, mismos que mediante el método de CoKriging fueron interpolados a todo el país, usando la altitud como covariable. El resultado obtenido se exportó a raster y después a formato ASCII, a una resolución espacial de aproximadamente 1 km^2 (0.008333333333°). En el proceso se usó el datum WGS84, para evitar la pérdida de variabilidad ambiental por resoluciones bajas, y al mismo tiempo hacerlas compatibles con el conjunto de variables WorldClim generadas por Hijmans *et al.* (2005) y las superficies climáticas para México por Cuervo-Robayo *et al.* (2013).

2.8.3 Generación de superficies biológicas

Basado en datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS 2009 - 2014), de cada sitio se obtuvo la siguiente información: número de especies (Nsp), número de árboles por hectárea (Na), diámetro normal promedio (Dnp), altura promedio de los árboles (Hp), área basal por hectárea (Ab), área de copa promedio por hectárea (Acp) y suma del área de copa por hectárea (Acs), estas fueron interpoladas bajo el mismo procedimiento CoKriging anterior. Adicionalmente se usaron las cubiertas ASCII de altitud (Al), pendiente (Pe) y exposición (Ex) en la misma resolución espacial.

2.8.4 Modelación de la distribución actual y futura de descortezadores

Para generar los modelos de distribución potencial actual y futura, se empleó la información de presencia de descortezadores del INFyS 2009 - 2014, la modelación final se realizó usando el programa MaxEnt versión 3.3.3k (Maximum Entropy Species Distribution Modeling) (Phillips *et al.*, 2006). El resultado fueron 245 sitios distribuidos en zonas boscosas de todo el país, donde se reportó la presencia del descortezador a nivel género, debido a la dificultad de identificarse en campo; para la modelación, 50 % del total de registros se usó para entrenamiento y el resto para prueba.

Los modelos fueron generados usando tres conjuntos de variables: a) superficies climáticas generadas en este estudio, b) variables Bioclim y c) superficies biológicas también generadas en este proyecto. Las variables Bioclim se usaron para modelar la distribución de descortezadores tanto actual como futura al 2050 y 2070, usando los escenarios RCP45 y RCP85, del modelo interdisciplinario para investigación del cambio climático MIROC5. Los modelos fueron evaluados acorde a pruebas curva de respuesta (análisis de omisión/comisión) y sensibilidad Curva Operada por el Receptor (ROC) - Área bajo la curva (AUC) (Aguirre y Duivenvoorden, 2010) y pruebas Jackknife para medir el efecto de cada variable en el modelo (Hijmans *et al.*, 2005). Los modelos obtenidos en MaxEnt fueron reclasificados en ArcMap 10.2, para obtener superficies en los diferentes niveles de probabilidad y con ello obtener el perfil bioclimático de los descortezadores.

3. Resultados

3.1 Especies de descortezadores por área de estudio

A nivel general, para los sitios de estudio se observa la dominancia en la abundancia de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en relación a *D. adjunctus*; sin embargo, es posible observar la tendencia de distribución por zona (Figura 3).

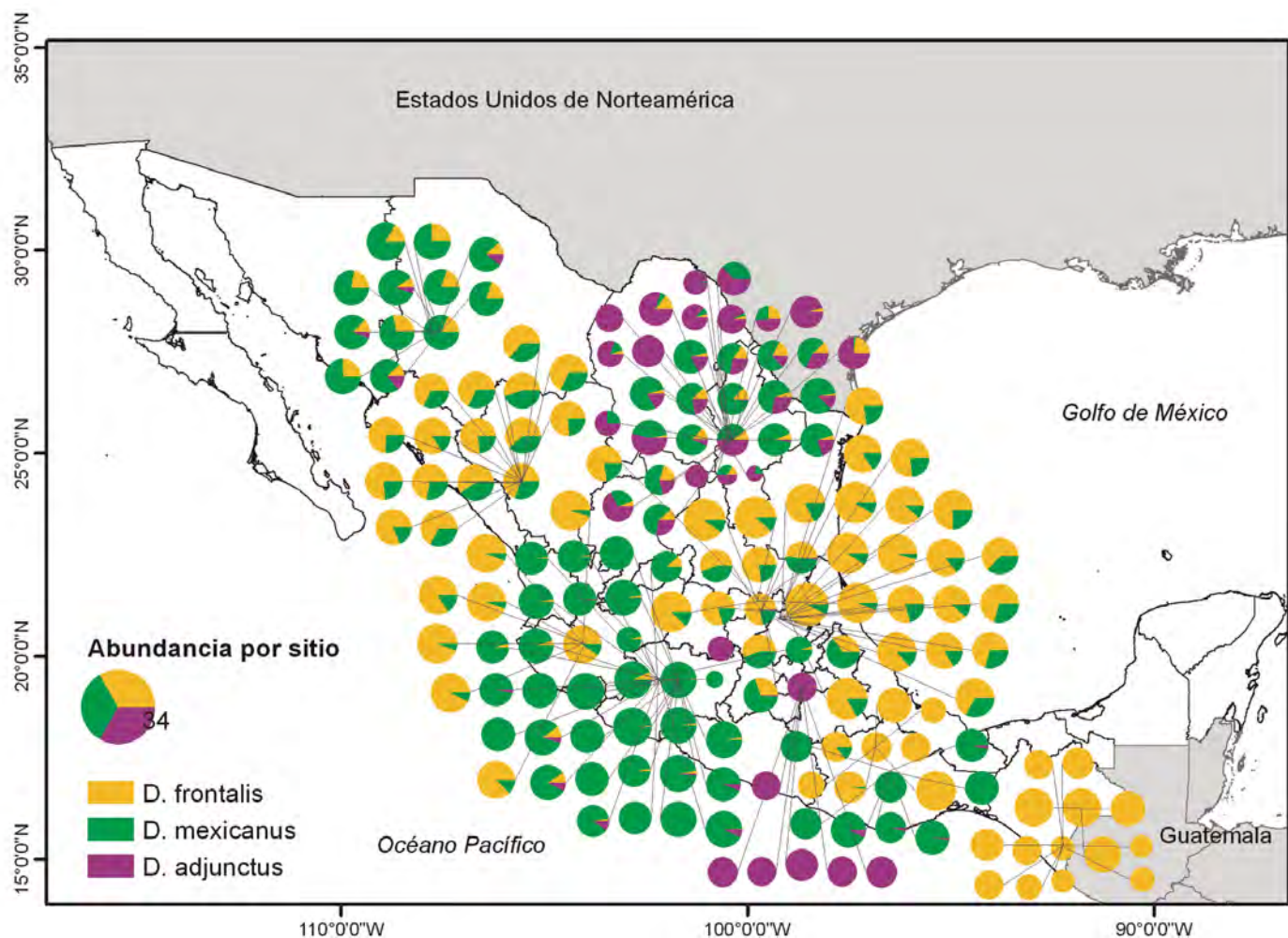


Figura 3. Abundancia por especie de descortezador por sitios de estudio.

Los sitios de mayor abundancia fueron: Hidalgo, Jalisco y Querétaro para *D. frontalis* con un promedio de 162 mil individuos dentro del periodo de muestreo (24 meses) para *D. mexicanus* dentro de los mismos estados incluyendo Michoacán fue de 32 mil individuos (Figura 4), mientras que para *D. adjunctus* fue de 341 individuos en los cuatro estados de la república de mayor densidad de captura.

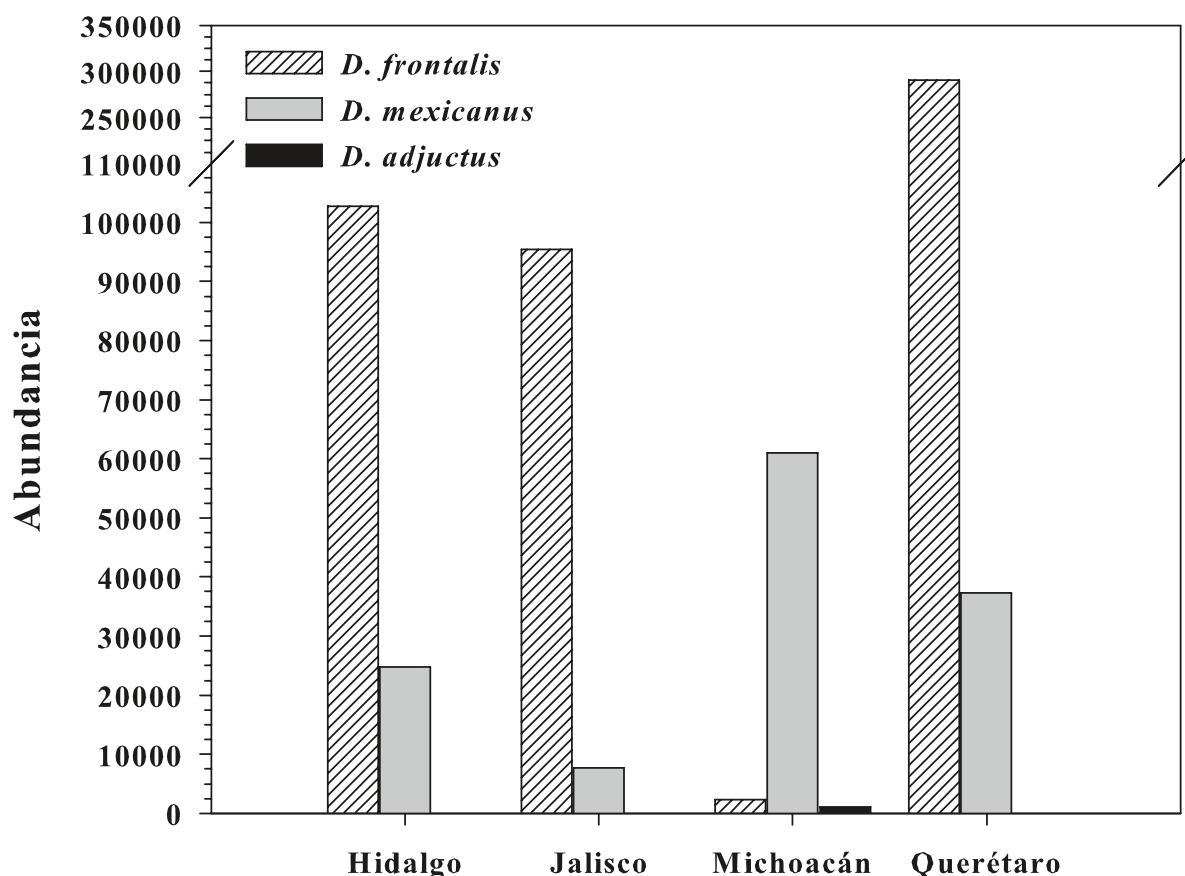


Figura 4. Abundancia por especie de descortezador por sitios de algunos estados de la República Mexicana (sitios con densidades de captura superiores a 50 mil individuos).

El resto de los sitios representó en total capturas menores a 50 mil individuos, con clara dominancia para *D. frontalis* dentro de los estados de Chiapas, Durango y Oaxaca, la abundancia promedio dentro de estos sitios fue de 28 mil individuos (Figura 5), para *D. mexicanus* las mayores abundancias se reportaron en Chihuahua, Nuevo León, Durango y Oaxaca, en promedio 14 mil individuos; finalmente para *D. adjunctus*, se estimaron en promedio 2,162 individuos, principalmente en los estados de Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Estado de México y Oaxaca (Figura 6).

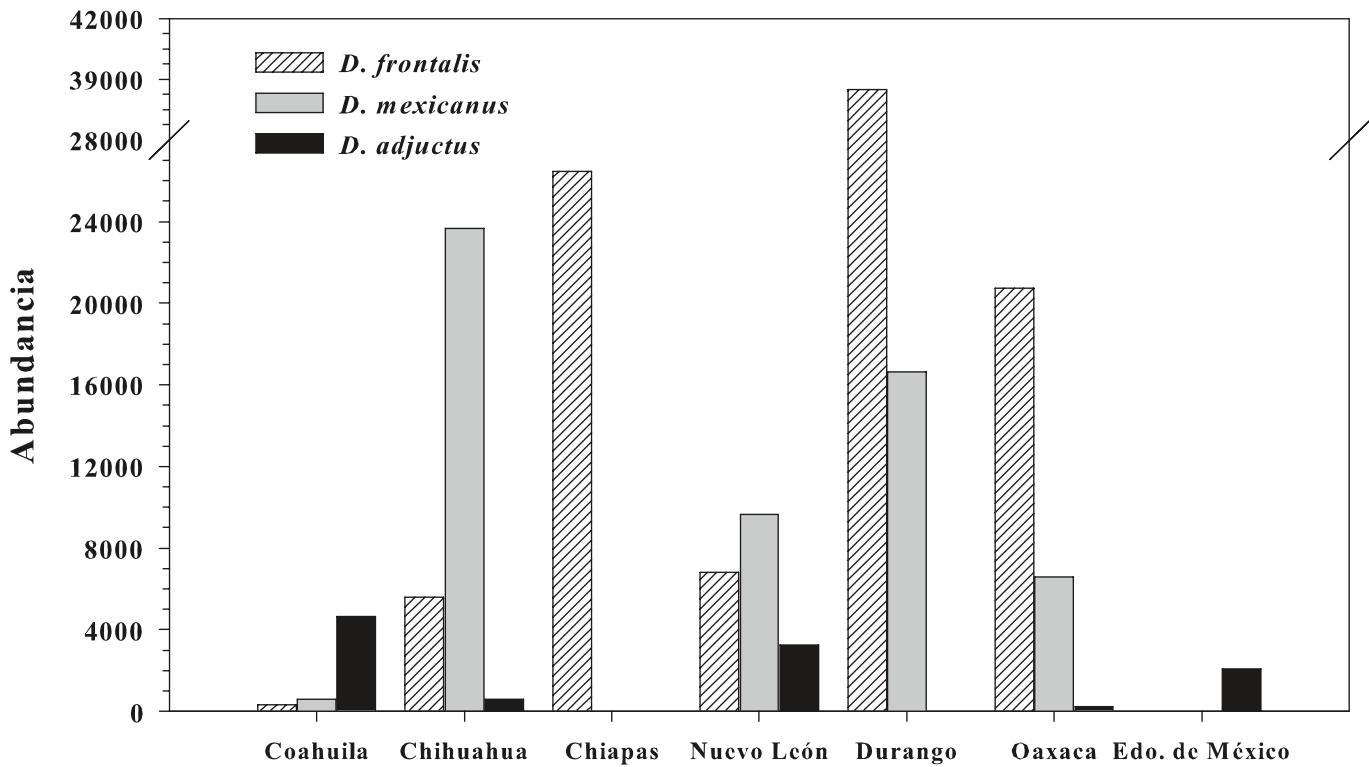


Figura 5. Abundancia por especie de descortezador para algunos estados de la República Mexicana (sitios con densidades de captura menores a 50 mil individuos).

Aunado a las especies de descortezadores principales del estudio (*D. frontalis*, *D. mexicanus* y *D. adjunctus*) fue posible evaluar algunas otras especies de insectos asociados a las poblaciones de descortezadores, dentro de los que sobresalen los géneros *Hylastes* e *Ips* (Figura 6).

Dicha información es importante para conocer parte de la ecología de las poblaciones de insectos descortezadores y asociados, además de periodos de mayor abundancia para cada grupo y género.

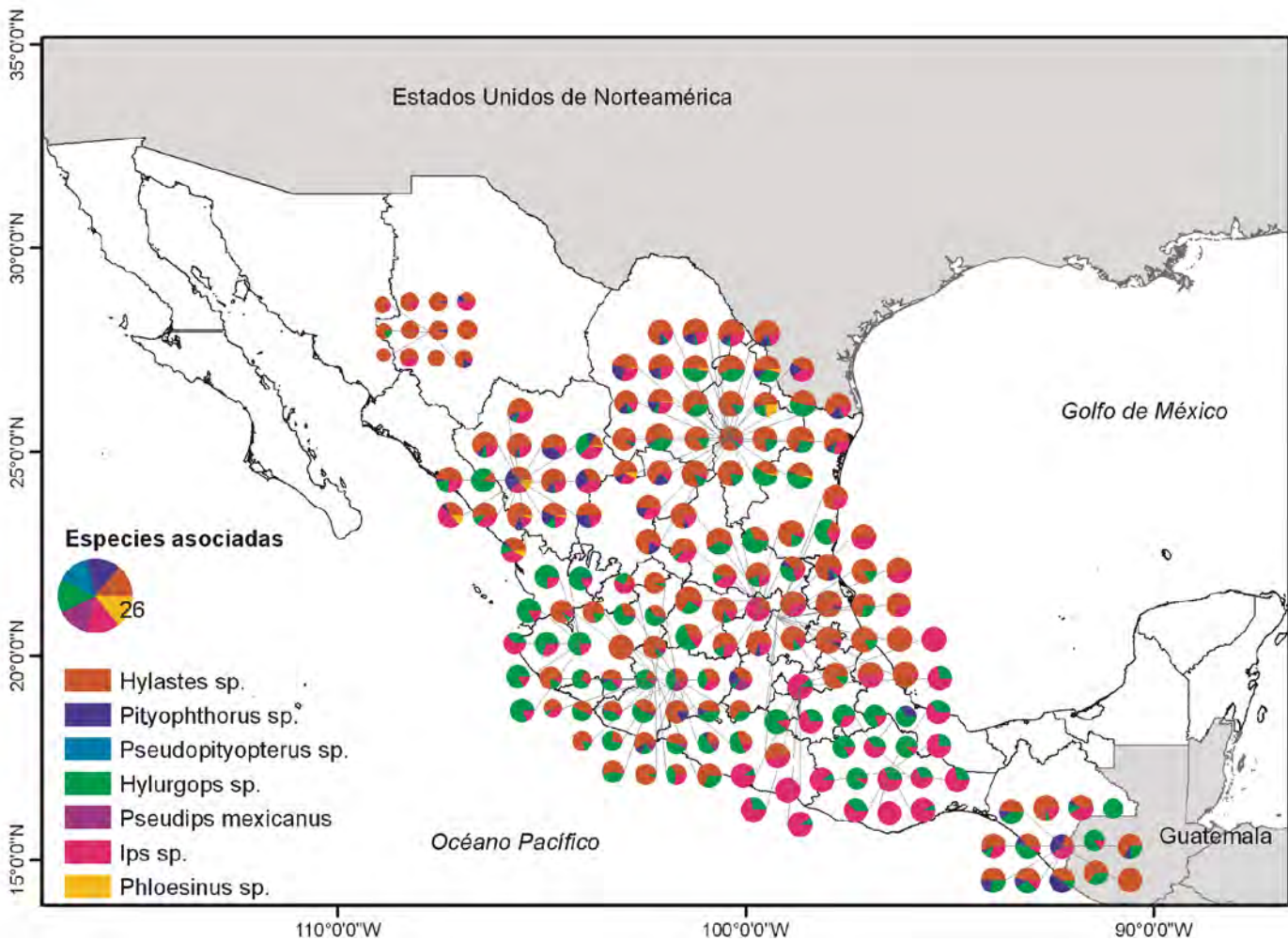


Figura 6. Abundancia por especie asociadas a descortezador por sitios de estudio.

Los estados que registraron mayor abundancia de *D. mexicanus* fueron: Michoacán, Querétaro, Hidalgo, Chihuahua, y Durango, con 60 mil para el primero y 16 mil individuos para el último; entre 9 y 6 mil individuos para Nuevo León, Jalisco y Oaxaca (Figura 15, 17 y 19); menos de 600 individuos en Coahuila, y cero para Chiapas (Figura 21 y 23). De *D. frontalis*, se tiene que Querétaro registró casi 300 mil insectos durante el tiempo de estudio, Hidalgo con 102 mil, Jalisco con 95 mil, 38 mil Durango, y entre 20 y 26 mil,

Oaxaca y Chiapas respectivamente. Nuevo León, Chihuahua y Michoacán registraron menos de 7 mil. Estas diferencias son debidas especialmente a la ubicación del sitio de muestreo; es decir, a zonas con diferentes niveles de ataque por descortezadores pero también a la distribución altitudinal de los sitios, la cual es dependiente de cada especie de descortezador. En Jalisco existe una relación de 13:1 insectos entre *D. frontalis* y *D. mexicanus*, de 8:1 en Querétaro y Estado de México; mientras que en

Durango, Hidalgo, Oaxaca, Nuevo León y Coahuila, la relación es de 2:1 en promedio.

De forma general, casi el 30 % de los registros de insectos de *D. mexicanus* ocurrió en abril y mayo; noviembre y enero registraron 5.6 y 4.6 % respectivamente, el resto de los meses promedia un 7.5 % del total, siendo los meses más representativos junio y julio. De febrero a abril se cuantificó el mayor número de individuos de *D. frontalis* representando el 37.5 % del total, tan solo abril constituyó el 15.5 %; durante noviembre, diciembre y enero solo se registró el 15 %.

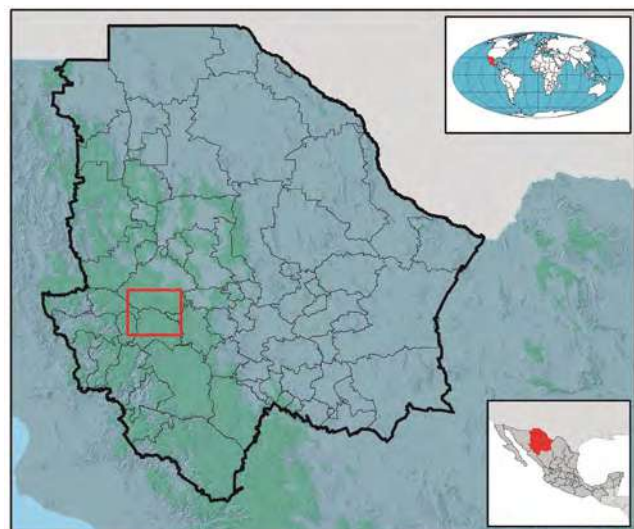
La abundancia de *D. mexicanus* y *D. frontalis* de forma altitudinal fue muy diversa, pero se observó que la altitud

de 2,500 msnm es en la que se presentó mayor abundancia de estas especies de insectos, pero registrándose la segunda especie sin ningún inconveniente desde 1,400 (Chiapas) hasta 3,500 msnm (Estado de México).

En general la abundancia de las poblaciones de descortezadores fue poco uniforme tanto a nivel temporal como espacial. En los sitios de cada estado de la república mexicana se presentaron dinámicas diferentes a lo estipulado en diversa literatura, es decir, los patrones de distribución espacio-temporal se modificaron de acuerdo al año de monitoreo (2015 y 2016). De forma independiente se describe cada sitio en particular.

3.2.1 Chihuahua

En el periodo entre marzo de 2015 a marzo de 2017, se registró una abundancia total de 29,851 individuos. El 19 % se identificó como *D. frontalis*, 79 % como *D. mexicanus*, y sólo 2 % como *D. adjunctus*. Así mismo, se registraron 12,700 individuos, de especies como *D. brevicomis*, *D. valens*, *D. approximatus* y *D. paralelicollis*; además de géneros como *Hylastes*, *Pityophthorus* e *Ips*, entre otros.



Como parte del 1^{er} periodo de muestreo (abril 2015 – marzo 2016), dentro del estado se colectaron 17,159 ejemplares, de los cuales el 75 % correspondieron a *D. mexicanus*, el 23 % a *D. frontalis* y el 2 % a *D. adjunctus*. Para el 2^{do} periodo (abril 2016 – marzo 2017), se colectaron 11,671 ejemplares, es decir, 32 % menos que el periodo anterior. De esta colecta, el 88 % se identificó como *D. mexicanus*, el 11 % como *D. frontalis*, y el 1 % como *D. adjunctus* (Figura 7).

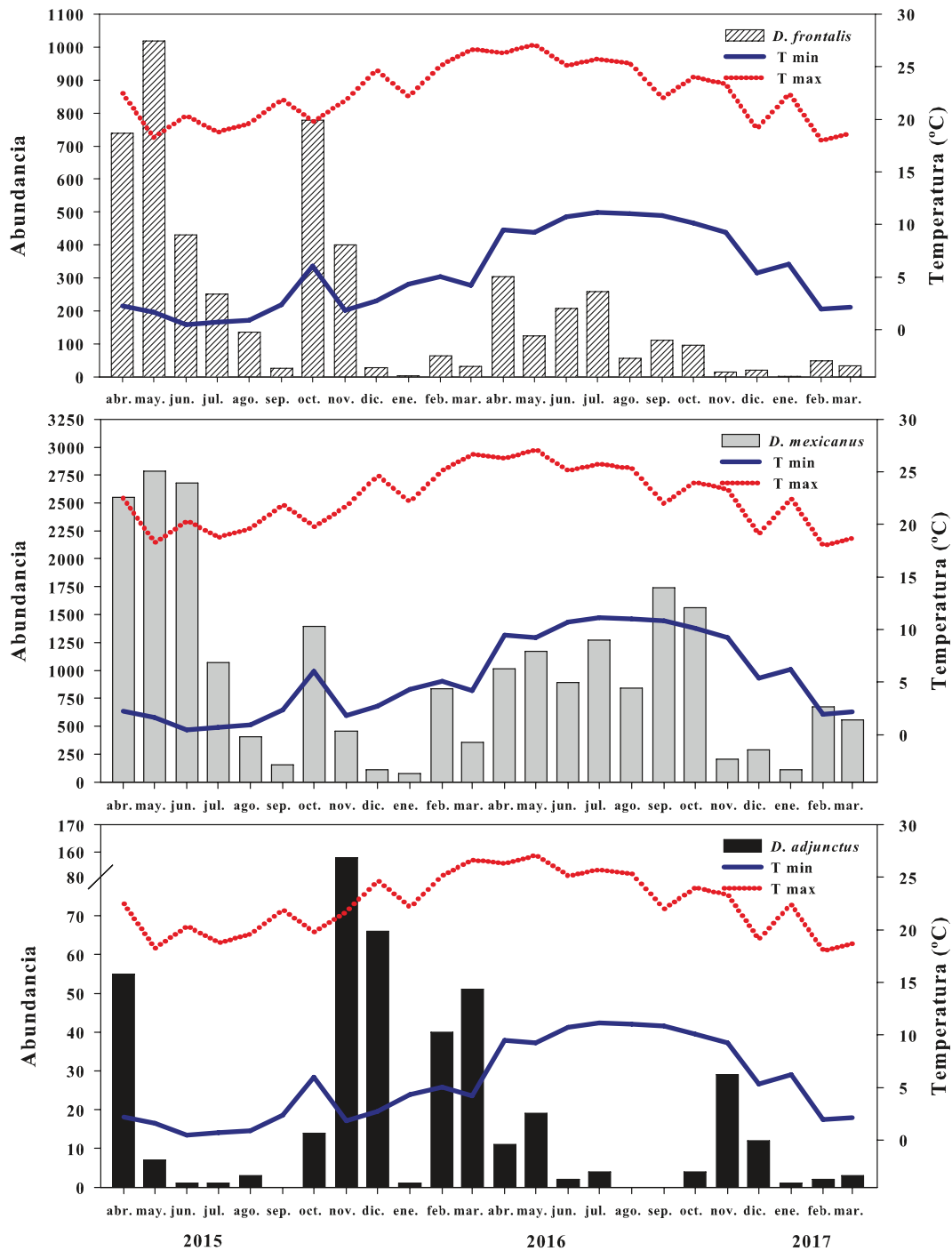


Figura 7. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Chihuahua.

De acuerdo a la Figura 7, durante el 1^{er} año de colecta, la dinámica de *D. frontalis* es similar a *D. mexicanus*, con picos de actividad en los meses de abril, mayo y octubre. Durante el 2^{do} año de colecta, ambas especies se comportan de forma irregular, con picos de actividad en abril-julio para *D. frontalis*, y en septiembre-octubre para *D. mexicanus*. En cuanto a *D. adjunctus*, registra un periodo máximo de actividad en noviembre del primer año, así como de menor intensidad en los meses de abril, diciembre y febrero. Para el segundo año, se observa mayor incidencia en los meses de mayo, noviembre y diciembre.

Durante los dos años de muestreo, se registró una temperatura anual promedio de 11.5 °C. En la temperatura mínima promedio, se registró una diferencia de 5.6 °C aproximadamente, entre el 1^{er} y 2^{do} periodo, con 2.7 y 8.3 °C, respectivamente. Para la temperatura máxima, la diferencia entre los dos años fue de 1.4 °C, con 21.8 °C en el primer periodo, y 23.2 °C en el segundo. A escala quincenal, la temperatura mínima alcanzó rangos entre -1.3 a 7.6 °C y 1.5 a 11.3 °C, mientras que la temperatura máxima se mantuvo entre 14 a 27 °C. A pesar de la variación en la temperatura durante los dos periodos de colecta, no se encontró correlación de esta variable con el patrón en la abundancia de las tres especies mencionadas.

Dentro del gradiente altitudinal, la abundancia de *D. frontalis* y *D. mexicanus* presentó un comportamiento similar, con mayor actividad a los 2,360 msnm, y algunos picos de menor intensidad en 2,440 y 2,583 msnm (Figura 8).

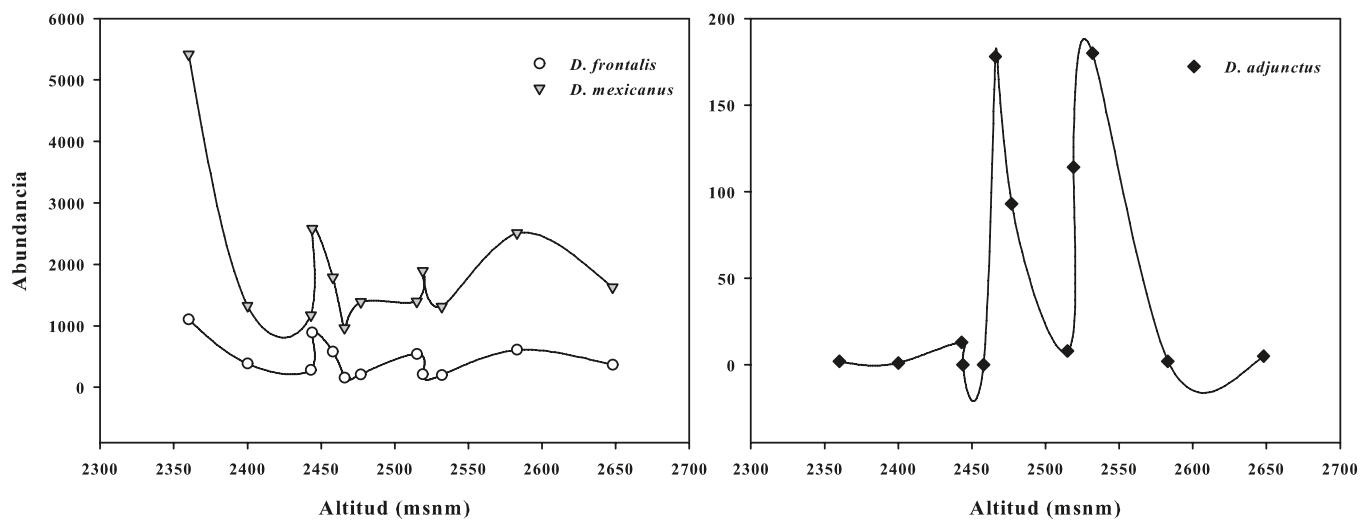
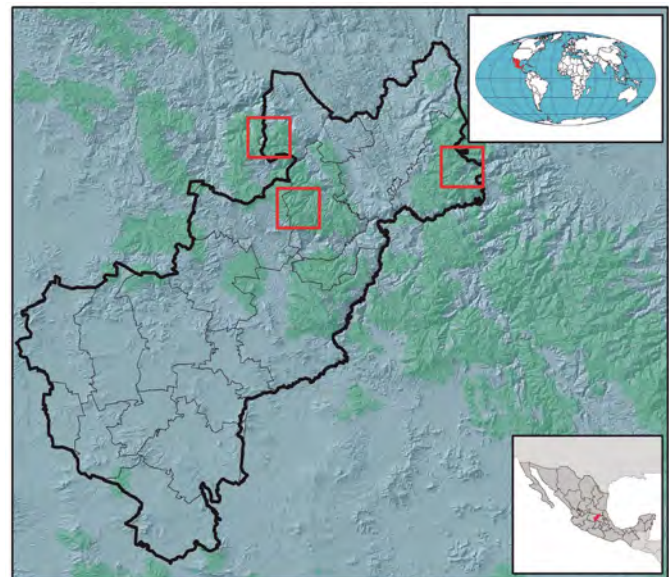


Figura 8. Abundancia altitudinal por especie de descortezador para el sitio de Chihuahua.

Por su parte, *D. adjunctus* mostró un comportamiento errático, con dos puntos de mayor abundancia en 2,466 msnm y 2,532 msnm. De las tres especies, sólo los valores de *D. mexicanus* se ajustaron significativamente a una regresión polinomial de 2^{do} orden ($r^2 = 0.48$; $P < 0.05$; $F = 4.31$), en respuesta al gradiente altitudinal.

3.2.2 Querétaro

En el Estado de Querétaro se obtuvo una colecta de 327,545 ejemplares en el periodo comprendido entre febrero de 2015 y marzo de 2017. Aproximadamente el 88.58 % de esta cifra corresponde a *D. frontalis*, 11.39 % a *D. mexicanus*, y 0.03 % a *D. adjunctus*. Adicional a estas tres especies, se registró una abundancia de 39,961 individuos, de especies como *D. approximatus*, *D. valens*, *D. brevicomis* y *D. paralelicollis*, además de géneros como *Hylastes*, *Pityophthorus*, *Hylurgops* e *Ips*, por mencionar algunos.



En el 1^{er} año de muestreo, se colectaron 175,218 individuos, de los cuales el 91.24 % se clasificó como *D. frontalis*, el 8.72 % como *D. mexicanus*, y 0.03 % como *D. adjunctus*. Para el 2^{do} año de muestro, se colectó un total de 121,206 ejemplares, es decir, 31 % menos que el año anterior (Figura 9).

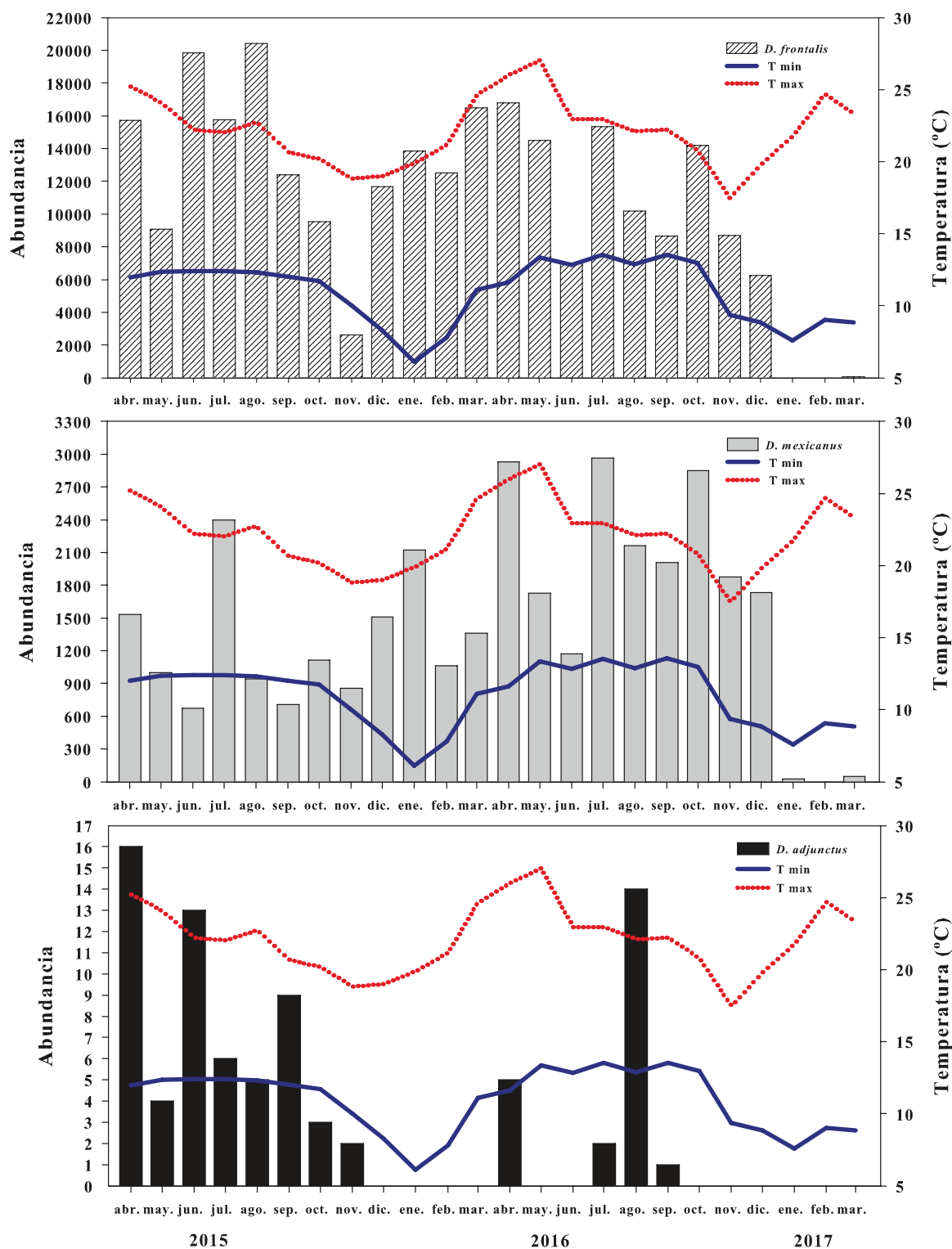


Figura 9. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Querétaro.

Ambas especies tanto *D. frontalis* como *D. mexicanus* tuvieron una actividad constante durante los dos años de muestreo, a excepción de los meses de enero-abril, donde disminuyeron notablemente. Este periodo coincidió con labores de saneamiento cercanas a los sitios de muestreo. Por su parte *D. frontalis* muestra puntos máximos de actividad en junio y septiembre del primer periodo, y abril del segundo. Así mismo, *D. mexicanus* registró una mayor actividad durante los meses de julio, diciembre y enero del 1^{er} año, y abril, julio y octubre del 2^{do} año (Figura 9).

Las variables de temperatura fueron muy similares en ambos años de muestreo. La temperatura media anual fue 15.4 °C, una temperatura mínima promedio de 11 °C, y una temperatura máxima promedio de 22.1 °C. A escala quincenal, la temperatura mínima se mantuvo en un rango de 5.7 a 15.3 °C. Por su parte, la temperatura máxima osciló entre 16 y 27 °C. Enero fue el mes con las temperaturas más bajas, y mayo con las temperaturas más altas.

Dentro del gradiente altitudinal tanto *D. frontalis* como *D. mexicanus* mostraron un comportamiento similar (Figura 10), con una ligera oscilación entre 1,589 y 1,996 msnm, un pico máximo de abundancia en 1,740 msnm, y una disminución paulatina en la abundancia, entre 2,468 y 3,058 msnm.

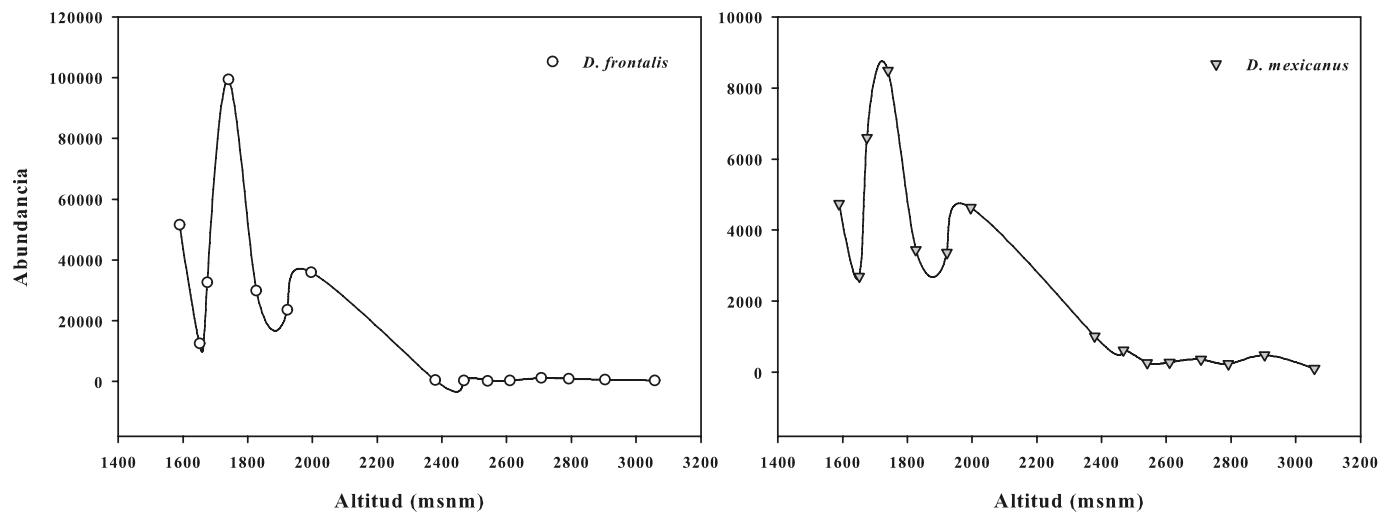


Figura 10. Abundancia altitudinal por especie de descortezador para el sitio de Querétaro.

Finalmente, *D. adjunctus* mostró un patrón errático, con dos picos principales de intensidad en 1,589 y 2,379 msnm. A excepción de *D. adjunctus*, los valores de abundancia de *D. frontalis* ($r^2 = 0.53$; $P < 0.05$; $F = 6.88$) y *D. mexicanus* ($r^2 = 0.71$; $P < 0.001$; $F = 15.26$), se ajustaron significativamente a una regresión polinomial de 2^{do} orden, en respuesta al gradiente altitudinal.

3.2.3 Durango

En el periodo comprendido entre marzo de 2015 y marzo de 2016, dentro del sitio ubicado en el Estado de Durango, se colectó un total de 55,117 individuos clasificados como *D. frontalis* y *D. mexicanus*. De esta cifra, el 70 % correspondieron a la primera especie, y el 30 % restante a *D. mexicanus*. Dentro de todo el periodo de colecta, no se encontraron ejemplares pertenecientes a la especie *D. adjunctus*. De forma complementaria, se identificaron 35,419 ejemplares de especies como *D. valens*, *D. brevicomis*, *D. approximatus*, *D. paralelicollis* y *D. rhizophagus*, así como de los géneros *Hylastes*, *Pityophthorus*, *Hylurgops*, *Phloesinus* e *Ips*, entre otros (Figura 11).



Durante el 1^{er} año de muestreo, se registró una abundancia total de 30,055 ejemplares, 26,287 de *D. frontalis* y 3,768 de *D. mexicanus*. Durante el 2^{do} año se registró una abundancia de 21,436 ejemplares, 30 % menor al año anterior. En este periodo, *D. frontalis* tuvo una menor abundancia (9,216 individuos), respecto de *D. mexicanus*, que alcanzó 12,220 ejemplares.

En general, *D. frontalis* estuvo presente durante los dos periodos de muestreo (Figura 11). Sin embargo, tuvo mayor presencia durante el 1^{er} año, particularmente en los meses de abril, junio, noviembre y febrero. En contraparte, durante el 2^{do} año, tuvo cortos periodos de mayor actividad en los meses de abril y mayo, así como agosto. En el resto del periodo se mantuvo con bajas abundancias, respecto a las encontradas previamente. Por el contrario, *D. mexicanus* registró sólo algunos picos de mayor actividad durante los meses de abril-junio del 1^{er} año, pero mostró mayor intensidad durante todo el 2^{do} año, particularmente en abril, mayo, julio, septiembre, enero y febrero. Algunos de estos periodos coincidieron con picos de temperatura máxima; sin embargo no se encontró relación significativa entre ambas variables.

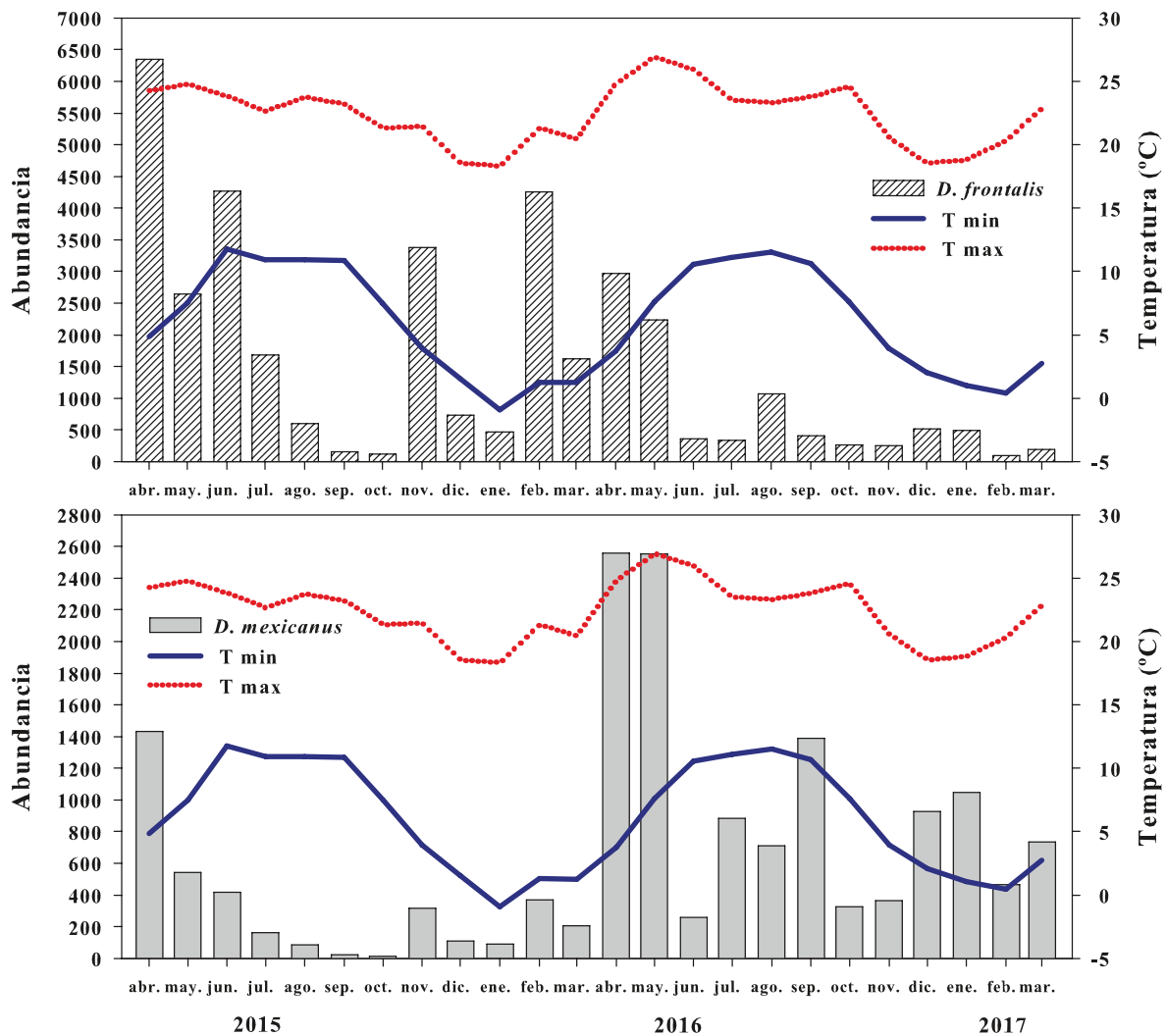


Figura 11. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio de Durango.

Las variables de temperatura fueron muy similares en ambos años de muestreo. La temperatura media anual fue 12.5 °C, una temperatura mínima promedio de 5.9 °C, y una temperatura máxima promedio de 22.5 °C. A escala quincenal, la temperatura mínima se mantuvo en un rango de -1.3 a 12.3 °C y de 0.1 a 11.8 °C. Por su parte, la temperatura máxima osciló entre 17 a 26 °C, y 16 a 29 °C, para el primer y segundo año, respectivamente.

Dentro del gradiente altitudinal ambas especies mostraron un comportamiento similar. En *D. frontalis* se observó un incremento en la abundancia de 2,300 a 2,500 msnm, y una disminución hasta los 2,600 msnm (Figura 12).

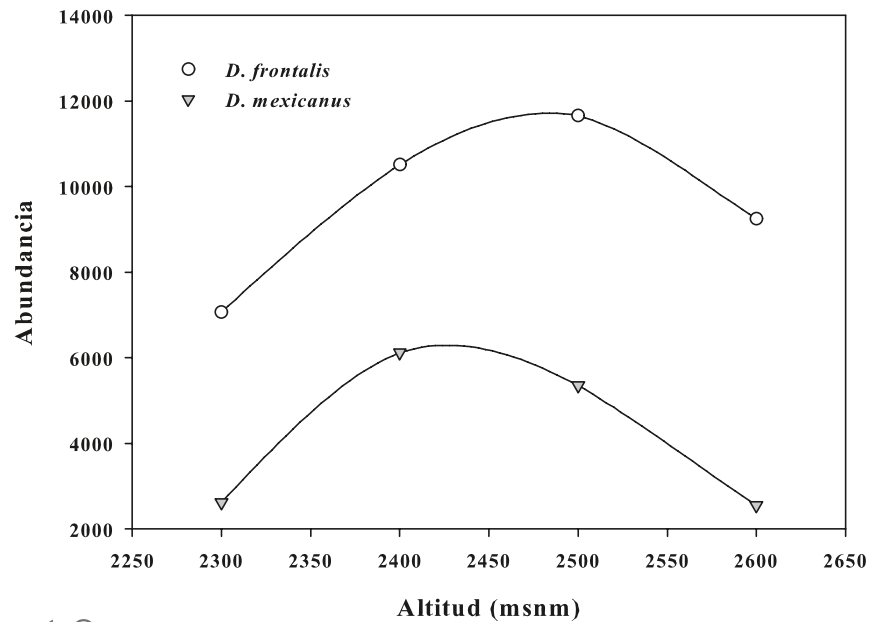
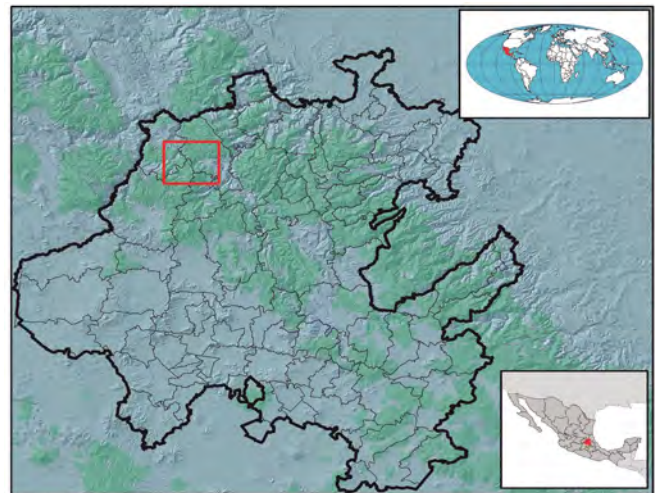


Figura 12. Abundancia altitudinal por especie de descortezador para el sitio de Durango.

De igual forma, *D. mexicanus*, incrementó de 2,300 a 2,400 msnm, pero disminuyó paulatinamente a partir de 2,500 msnm. No se encontró correlación significativa entre los cambios en el gradiente altitudinal, con la abundancia de las dos especies mencionadas.

3.2.4 Hidalgo

En el periodo entre marzo de 2015 a abril de 2017, dentro del Estado de Hidalgo se colectó un total de 127,586 individuos. El 80.5 % se identificó como *D. frontalis*, 19.4 % como *D. mexicanus*, y sólo 0.1 % como *D. adjunctus*. Así mismo, se registraron 25,579 individuos, de otras especies como *D. valens*, *D. approximatus* y *D. paralelicollis*; además de géneros como *Hylastes*, *Pityophthorus*, *Hylurgops* e *Ips*, entre otros (Figura 13).



Como parte del 1^{er} periodo de muestreo (abril 2015 - marzo 2016), dentro del estado se colectaron 77,407 ejemplares: 63,215 correspondieron a *D. frontalis*, 14,163 a *D. mexicanus* y 29 a *D. adjunctus*. Para el 2^{do} periodo (abril 2016 - marzo 2017), se colectaron 37,929 ejemplares, aproximadamente la mitad del periodo anterior. De esta colecta, 29,050 individuos se identificaron como *D. frontalis*, 8,876 como *D. mexicanus*, y sólo 3 como *D. adjunctus*.

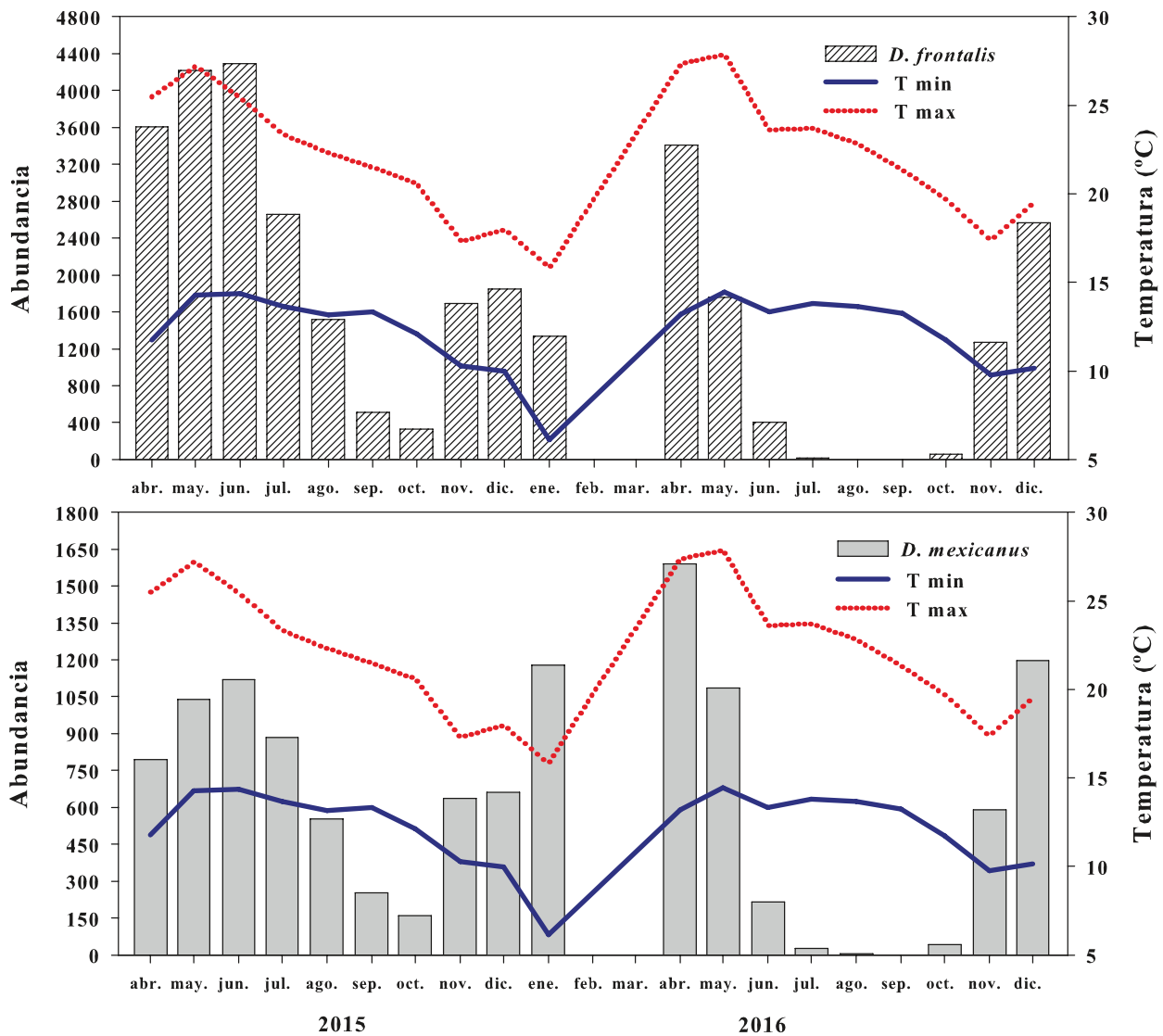


Figura 13. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el sitio1 Zimapán, en el Estado de Hidalgo.

En el Sitio 1, localizado en el municipio de Zimapán, Hidalgo, se registró una colecta total de 60,784 ejemplares, de los cuales 34,339 se colectaron durante el 1^{er} año, y 18,697 durante el 2^{do}. Durante ambos periodos de colecta, *D. frontalis* y *D. mexicanus* presentaron una dinámica similar, con cuatro periodos de intensidad notable. En el 1^{er} año, estos periodos fueron abril-junio y noviembre-enero; mientras que en el 2^{do} año fueron abril-mayo y noviembre-diciembre. Finalmente, durante los dos años, *D. adjunctus* registró una colecta sólo en el mes de abril de 2015.

Durante ambos periodos de muestreo, la temperatura media anual fue 15.7 y 16.4 °C, respectivamente. La temperatura mínima y máxima tuvo una variación de poco más de medio grado entre uno y otro año. En promedio se registró una mínima de 12.2 °C y una máxima de 22.1 °C (Figura 14).

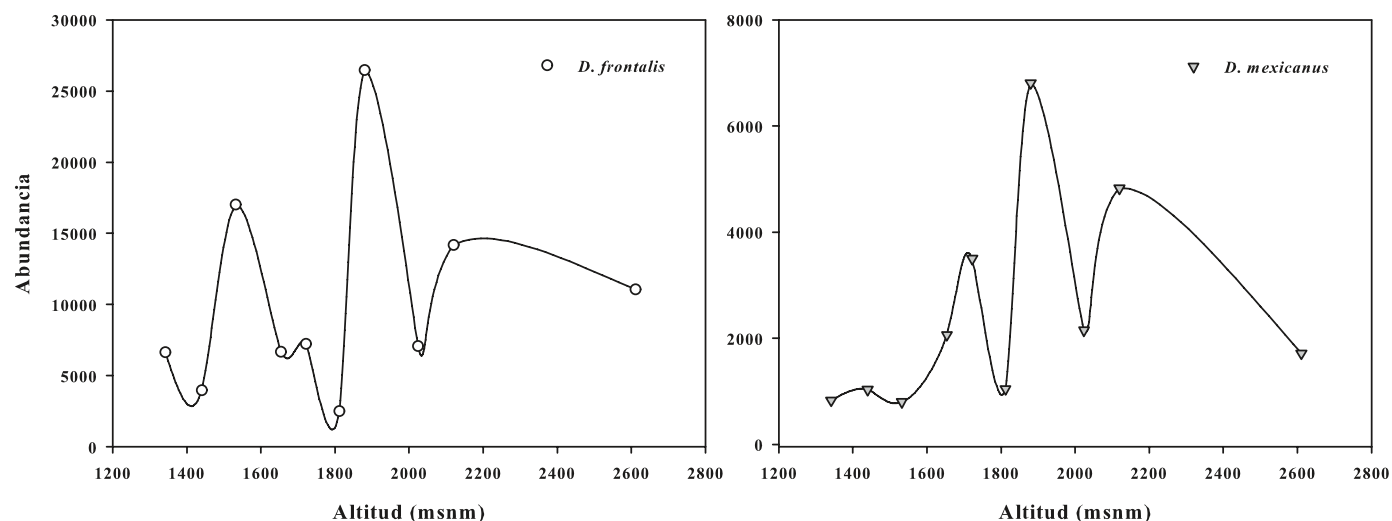


Figura 14. Abundancia altitudinal por especie el sitio1 Zimapán, en el Estado de Hidalgo.

A nivel quincenal, la temperatura mínima alcanzó rangos entre 5.8 y 15.4 °C, mientras que la temperatura máxima se mantuvo entre 14 y 29 °C. A pesar de la variación en la temperatura durante los dos periodos de colecta, no se encontró correlación de esta variable con el patrón en la abundancia de las tres especies mencionadas.

En el gradiente altitudinal, la abundancia de *D. frontalis* y *D. mexicanus* presentó un comportamiento irregular similar (Figura 14). En *D. frontalis* se observan dos puntos de mayor abundancia, en 1,532 y 1,880 msnm. Por su parte, *D. mexicanus* registra una mayor abundancia en 1,722, 1,880 y adicionalmente en 2,120 msnm. Debido a la distribución irregular de la abundancia de ambas especies, no se encontró correlación significativa entre esta variable con el gradiente altitudinal de los sitios de muestreo.

3.2.5 Nuevo León

En el Estado de Nuevo León, la abundancia de las tres principales especies de *Dendroctonus* fue de 19,684 individuos, cuantificados entre febrero 2015 y febrero 2017. De esta cifra, el 35 % corresponde a *D. frontalis*, 49 % a *D. mexicanus*, y 16 % a *D. adjunctus*. Adicional a estas tres especies, se registró una abundancia de 40,256 individuos, pertenecientes a otras especies de *D. approximatus*, *D. valens*, *D. brevicomis*, *D. rhizophagus* y *D. pseudosugae*; además de géneros como *Hylastes*, *Hylurgops*, *Ips* y *Phloesinus*.



En el periodo del 1^{er} año de muestreo, se colectaron 12,441 individuos pertenecientes a las tres principales especies. De esta cifra, el 78 % correspondió a *D. frontalis* y *D. mexicanus*, cada una con el 39 % de la abundancia. El 22 % restante correspondió a *D. adjunctus*. En el periodo se observaron picos de actividad importante entre los meses de abril-agosto para *D. frontalis*; así como de abril-junio y octubre-noviembre, para *D. mexicanus*. Por su parte, *D. adjunctus* tuvo actividad sólo en los meses de abril-junio y febrero (Figura 15).

Para el 2^{do} año de colecta, se registró una abundancia cuatro veces menor a la registrada en el 1^{er} año. En este año, se observó actividad sólo en *D. frontalis* y *D. mexicanus*, alcanzando abundancias de 317 y 3,103 individuos, respectivamente. *D. frontalis* experimentó un pico de actividad en abril; sin embargo, durante el resto del periodo mantuvo abundancias menores a los 50 ejemplares por mes. En general, *D. mexicanus* mostró algo parecido a una oscilación periódica, similar entre los dos años de colecta. La actividad de esta especie coincidió con dos puntos máximos de actividad en los meses de abril y noviembre, así como dos picos mínimos de actividad en los meses de septiembre y enero (Figura 15).

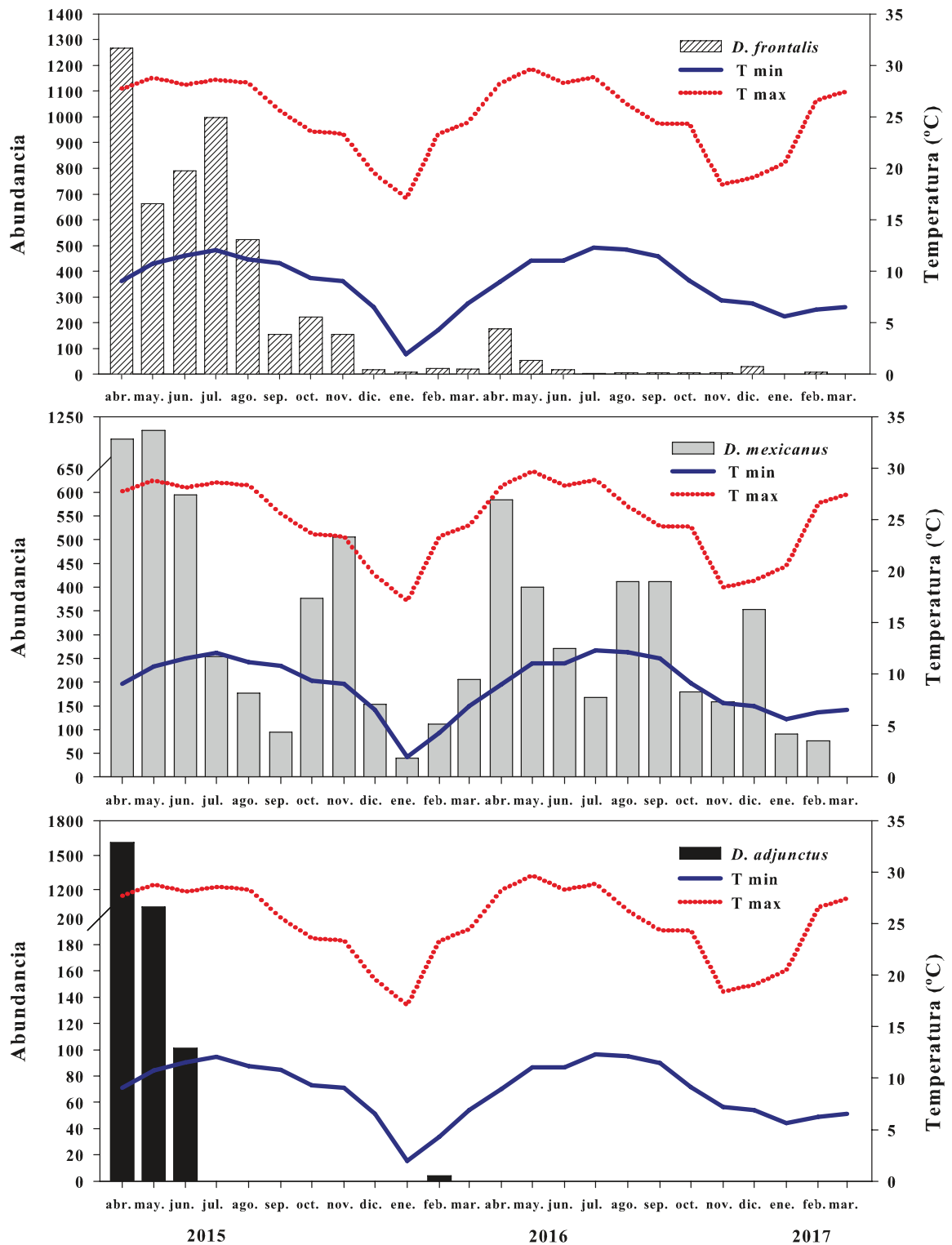


Figura 15. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Nuevo León.

Similar a lo observado en los estados anteriores, la temperatura de ambos años fue poco variable. La temperatura promedio del 2^{do} año de colecta fue de 14.9 °C, aproximadamente medio grado más que el 1^{er} año. De igual forma, se observó una variación similar en la temperatura mínima, de 8.6 °C para el primer año, y 9.2 °C para el segundo. Finalmente, la temperatura máxima registrada fue de 24.9 y 25.8 °C para el primero y segundo año, respectivamente. Particularmente en este valor, la variación entre ambos años fue cercana a un grado. En valores quincenales del primer año, la temperatura mínima se mantuvo en un rango de 1.7 a 12 °C, y la temperatura máxima entre los 15 y 29 °C. Por su parte, en el segundo año el rango de temperatura mínima incrementó de 4.8 a 13 °C; mientras que para la temperatura máxima aumentó de 16 a 31 °C. En ambos periodos de colecta, enero fue el mes con las temperaturas más bajas; así mismo, mayo y julio tuvieron las temperaturas más altas.

Respecto al gradiente altitudinal, las tres especies mostraron patrones de abundancia diferentes (Figura 16). En *D. frontalis* y *D. mexicanus*, se observó un incremento paulatino entre 1,950 y 2,350 msnm, y una disminución a partir de 2,400 msnm.

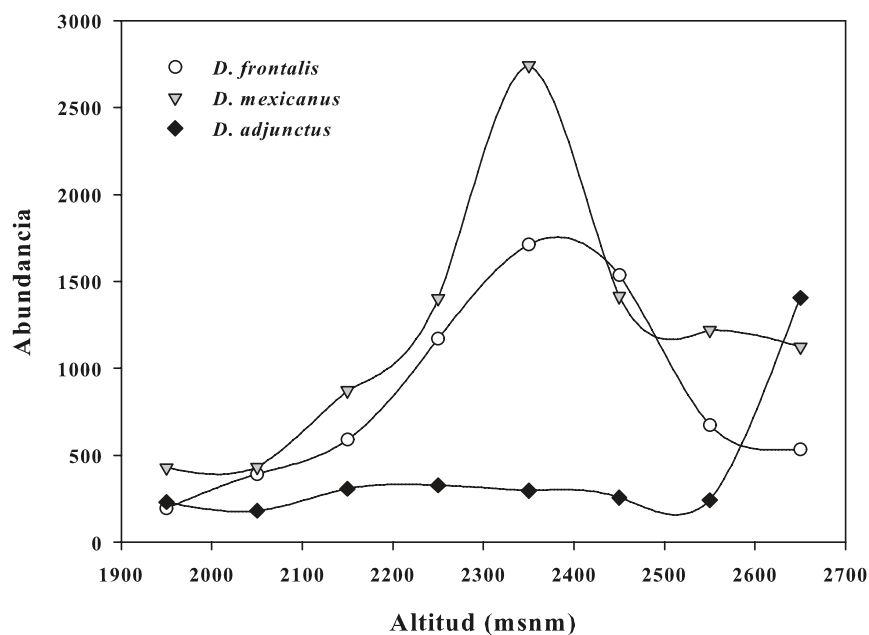
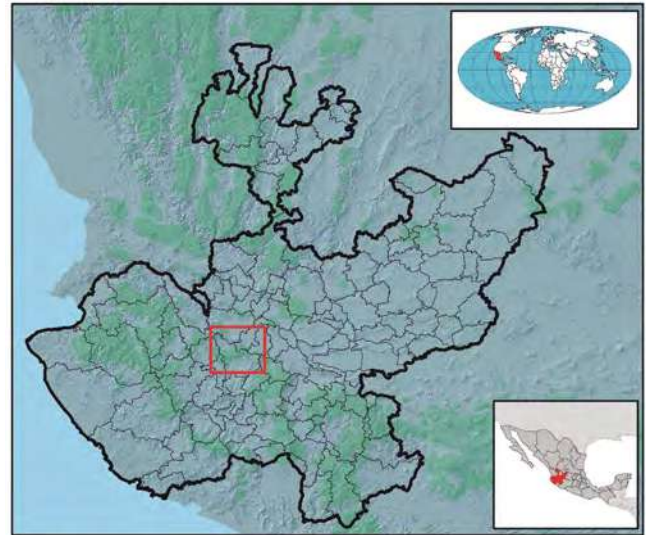


Figura 16. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Nuevo León.

En *D. adjunctus*, la abundancia se mantuvo constante entre 1,950 y 2,550 msnm, pero se observó un incremento importante hacia los 2,650 msnm. A diferencia de *D. mexicanus* y *D. adjunctus*, los valores de abundancia de *D. frontalis* se ajustaron significativamente a una regresión polinomial de 2^{do} orden ($r^2 = 0.73$; $P < 0.05$; $F = 6.80$), en respuesta al gradiente altitudinal.

3.2.6 Jalisco

La abundancia total registrada en el Estado de Jalisco durante febrero 2015 y marzo 2017, fue de 103,166 individuos: 95,436 de *D. frontalis*, 7,609 de *D. mexicanus* y 121 de *D. adjunctus*. En contra parte, se registraron 4,729 ejemplares de otras especies como *D. approximatus*, *D. valens*, *D. rhizophagus* y *D. paralelicollis*, además de algunos géneros como *Hylurgops*, *Ips*, *Hylastes* y *Pityophthorus*, entre otros.



Para el primer periodo de muestreo, las colectas ascendieron a los 46,049 ejemplares. De esta cifra el 93.3 % correspondió a *D. frontalis*, el 6.6 % a *D. mexicanus* y el 0.1 % a *D. adjunctus*. Durante el segundo periodo se mantuvo la proporción correspondiente a cada especie; sin embargo, la abundancia total aumentó a 55,852 individuos. En ambos periodos las tres especies se distribuyeron de forma irregular (Figura 17). Tanto *D. frontalis* como *D. adjunctus* registraron mayor actividad durante los meses de junio, septiembre y marzo del 1^{er} año; además de abril, octubre y marzo del 2^{do} año. Finalmente, a excepción de marzo del 2^{do} periodo, la actividad de *D. adjunctus* coincidió con el resto de los periodos de mayor intensidad de las dos especies anteriores. En general, dentro de los dos sitios ubicados en el Estado de Jalisco, la abundancia de las tres especies fue constante a lo largo de los dos años de muestreo.

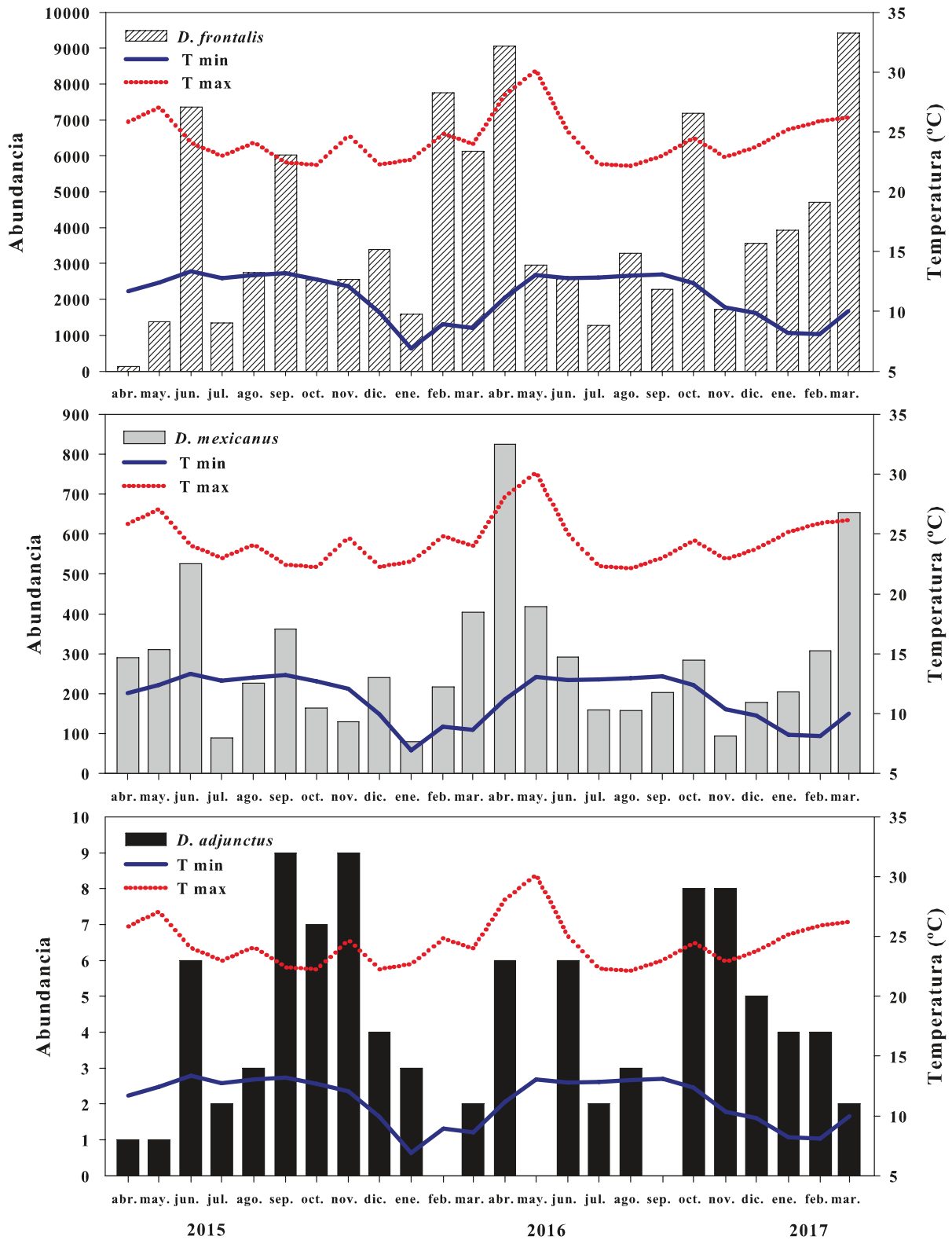


Figura 17. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Jalisco.

En cuanto a la temperatura, ambos años registraron valores similares, el segundo año con valores mayores sólo por centésimas de grado. En promedio, la temperatura anual fue de 16.1 y 16.5 °C, la mínima de 11.3 y 11.2 °C, y la máxima de 24 y 25.3 °C. A escala quincenal, la temperatura mínima osciló entre 6.6 y 13 °C, la máxima entre 21.4 y 30.5 °C. Enero fue el mes con temperaturas más bajas, mientras que mayo registró las más altas.

A escala altitudinal (Figura 18), la abundancia de *D. frontalis* reflejó un patrón sinusoidal, con un incremento entre 2,000 y 2,100 msnm, y una disminución en 2,200 y 2,300 msnm. Por su parte, la abundancia de *D. mexicanus* se distribuyó en forma de curva ligeramente simétrica, con un punto de abundancia máxima en 2,200 msnm.

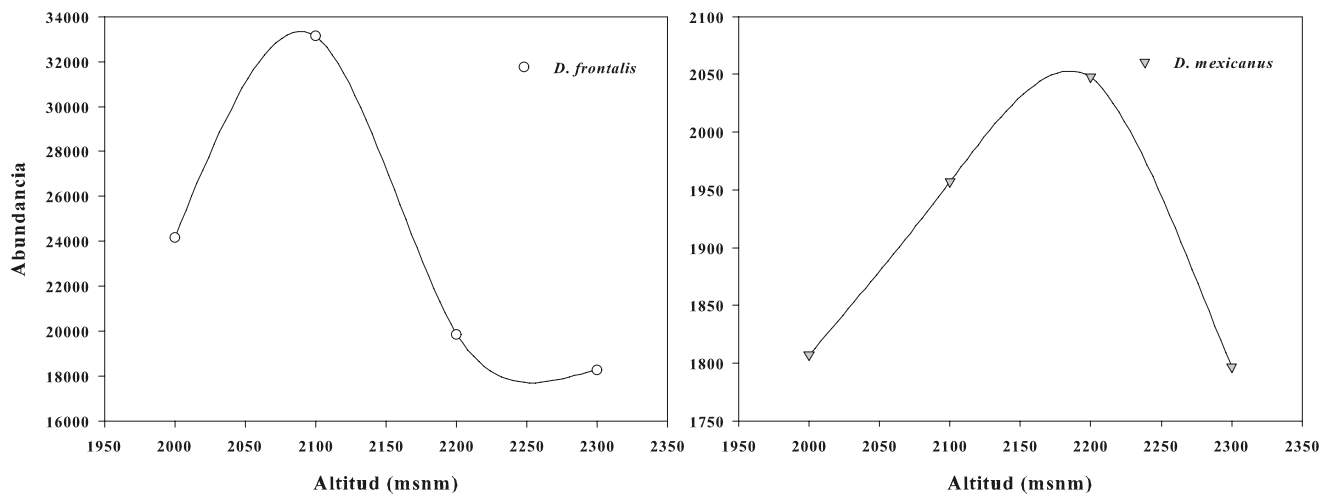
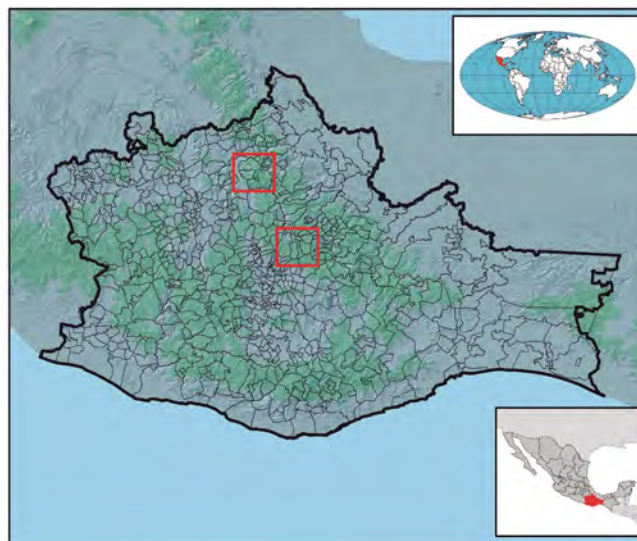


Figura 18. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Jalisco.

D. adjunctus mostró un patrón similar a *D. frontalis*, con mayor actividad a los 2,100 msnm. A pesar de los patrones observados en la distribución de la abundancia de las tres especies, no se encontró una correlación significativa entre ésta variable, con la distribución del gradiente altitudinal.

3.2.7 Oaxaca

En el estado de Oaxaca, se colectaron un total de 27,555 ejemplares, correspondientes a las tres especies principales del género *Dendroctonus*. De este total, el 75 % pertenecía a la especie *D. frontalis*, el 24 % a *D. mexicanus*, y el 1 % a *D. adjunctus*. Complementario a estos valores, se colectaron un total 11,900 ejemplares, de otras especies como *D. valens* y *D. brevicomis*, así como a los géneros *Hylurgops*, *Ips* y *Pityophthorus*, entre otros.



La dinámica de *D. frontalis* muestra una mayor actividad durante el primer año de muestreo, con una abundancia de hasta 11,984 ejemplares, colectados principalmente en los meses de abril, septiembre y marzo (Figura 19). Para el segundo año, la especie presentó una actividad limitada al mes de octubre, con una abundancia total de alrededor del 3.5 % respecto del primer año. Por su parte, *D. mexicanus* registró una actividad más constante durante todo el periodo de muestreo. La abundancia total osciló en 4,221 y 1,582 ejemplares, en el 1^{er} y 2^{do} año, respectivamente. Sus puntos de mayor actividad fueron en agosto, septiembre y marzo, así como abril del 2^{do} año. A excepción de este mes, el resto del año se mantuvo con una abundancia mensual menor a 140 ejemplares (Figura 19).

A diferencia de *D. frontalis* y *D. mexicanus*, las colectas de *D. adjunctus* fueron bajas. Por año, la abundancia fue de 224 y 11 individuos, respectivamente. A lo largo del periodo, se registró un punto máximo de actividad en el mes de agosto del primer año, y otro en el mes de julio del segundo año. Éste último fue además, la última colecta registrada para la especie.

En general, en el caso de *D. frontalis* y *D. mexicanus*, se observa que algunos periodos de mayor actividad, coinciden con los puntos de temperatura máxima quincenal. En *D. frontalis*, los puntos de mayor actividad de los meses de abril, coincidieron con los valores más altos de temperatura máxima de 26 y 27 °C, para el primero y segundo año, respectivamente. En *D. mexicanus*, esta asociación se observó sólo para el mes de abril 2016. Sin embargo, pese a esta correspondencia, no se encontraron correlaciones significativas entre la abundancia de las tres especies con las fluctuaciones de la temperatura dentro del Estado de Oaxaca.

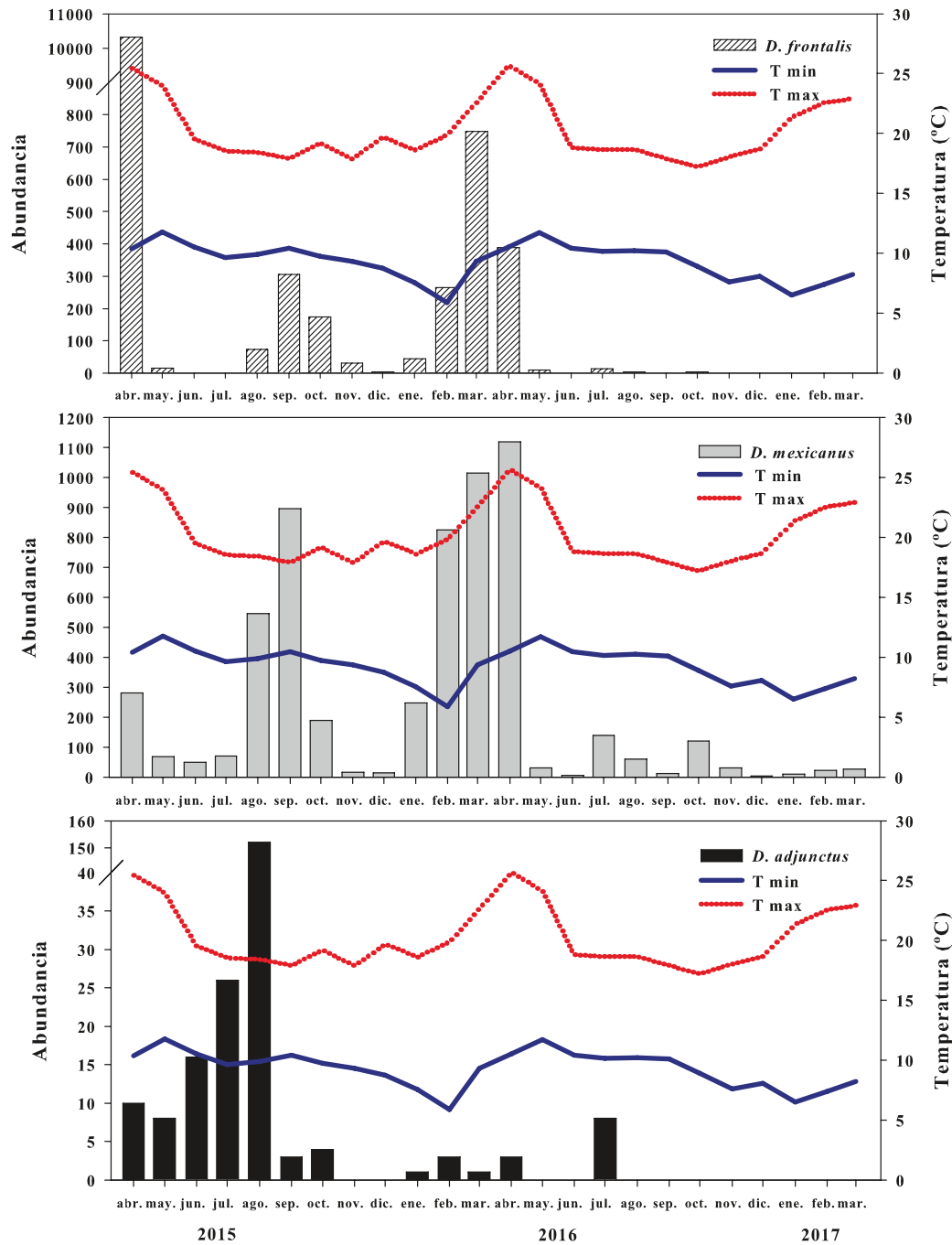


Figura 19. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Oaxaca.

Las variables de temperatura para el sitio de muestreo, fueron muy similares en ambos periodos de muestreo. En general, se registró una temperatura media anual de 13.4 °C, una temperatura mínima promedio de 9.3 °C, y una temperatura máxima promedio de 20.3 °C. A escala quincenal, la temperatura mínima se mantuvo en un rango de 4 a 11 °C y de 6 a 12 °C. Por su parte, la temperatura máxima osciló entre 17 a 23 °C, y 16 a 29 °C, para el primer y segundo año, respectivamente.

Dentro del gradiente altitudinal, la abundancia de las tres especies se comportó de forma distinta (Figura 20). Para *D. frontalis*, se observó una abundancia mayor a 18 mil ejemplares sólo a 2,345 msnm. En *D. mexicanus*, se presentó un incremento en la abundancia a partir de 2,113 y hasta 2,658 msnm, y una disminución radical a partir de 2,799 msnm.

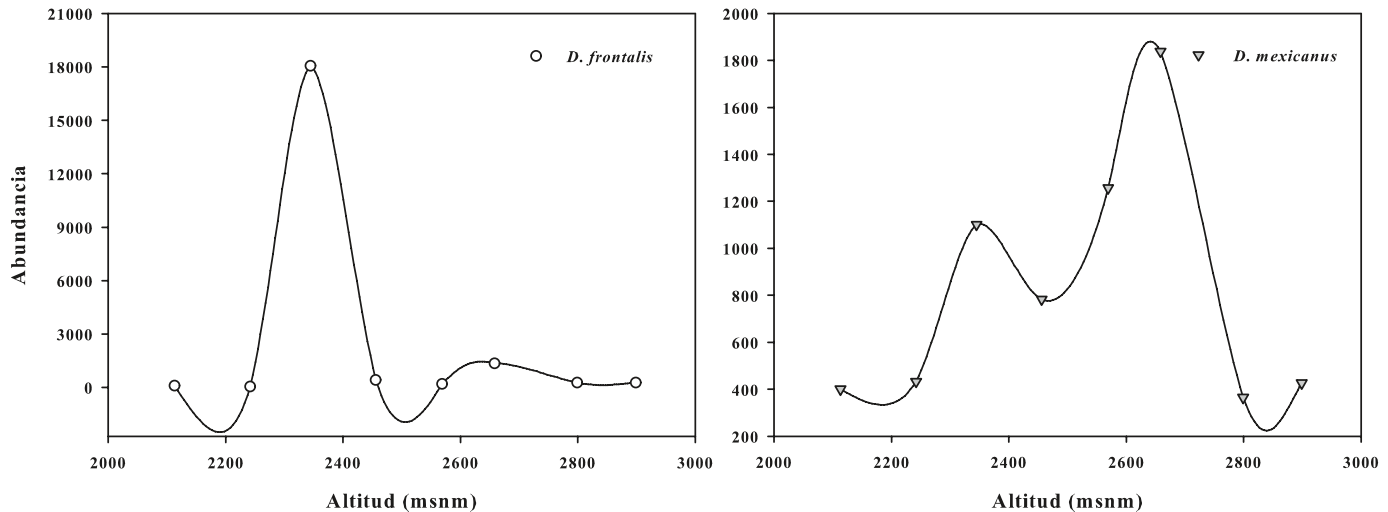
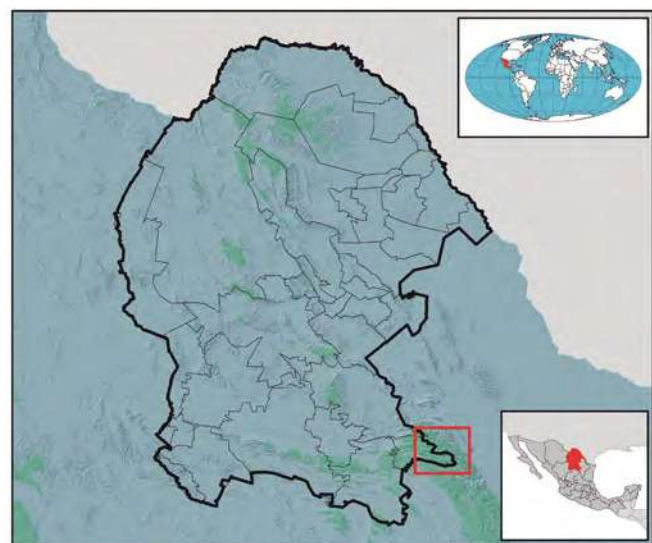


Figura 20. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Oaxaca.

Finalmente, *D. adjunctus* mostró sólo un punto máximo de abundancia en 2,658 msnm; sin cambios importantes en los demás gradientes altitudinales. Para el Estado de Oaxaca, no se encontró una correlación significativa entre los cambios en el gradiente altitudinal, con la abundancia de las tres especies mencionadas.

3.2.8 Coahuila

La abundancia total registrada en el Estado de Coahuila durante febrero 2015 y febrero 2016, fue de 5,575 individuos, de los cuales 4,645 fueron *Dendroctonus adjunctus*, 588 de *D. mexicanus* y 342 de *D. frontalis*. En contraparte, se registraron 5,634 individuos de otras especies como *D. approximatus*, *D. brevicomis* y *D. paralelcollis*. Adicionalmente se estimó una abundancia de 34,461 individuos de géneros como *Hylurgops*, *Ips*, *Hylastes* y *Pityophthorus*.



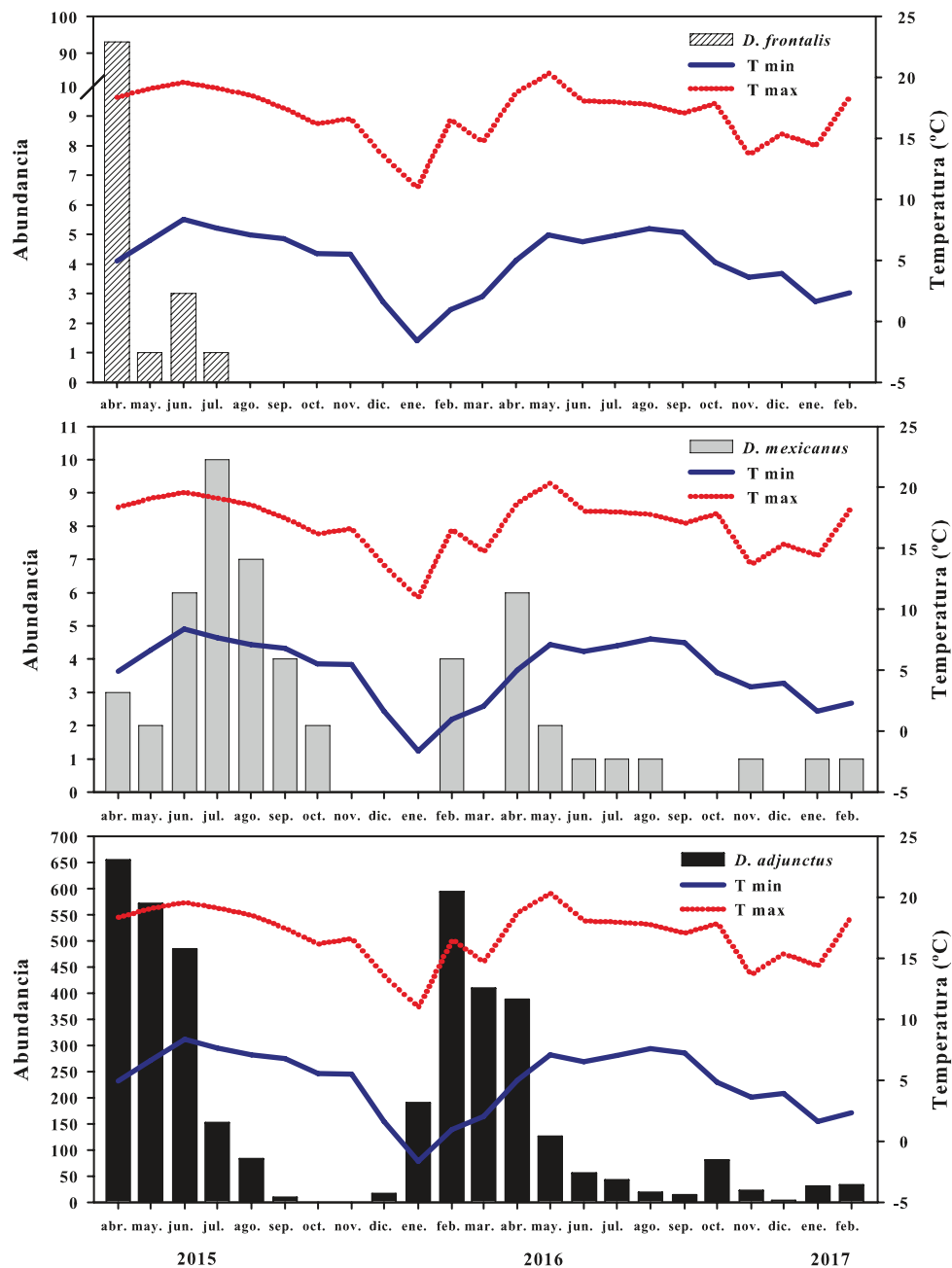


Figura 21. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Coahuila.

Las tres especies principales se distribuyeron de forma irregular durante los dos años de muestreo (Figura 21). *Dendroctonus frontalis* sólo se registró en los primeros meses de colecta del 1^{er} año. Por su parte, *D. mexicanus* registró baja actividad durante los dos años, con picos máximos en julio y agosto de 2015. Finalmente, *D. adjunctus* tuvo mayor actividad durante todo el 1^{er} año. Sin embargo, durante el segundo año, la abundancia fue baja (menor a 50 individuos) a partir de la segunda quincena del mes de mayo. En general, los picos de mayor actividad de la especie se observaron entre abril-junio 2015 y febrero-abril 2016.

En cuanto a la temperatura, ambos años registraron valores similares, el segundo año con valores mayores sólo por centésimas de grado. En promedio, la temperatura anual fue de 9.3 y 9.6 °C, la mínima de 4.6 y 4.9 °C, y la máxima de 16.7 y 17.4 °C. A escala quincenal, la temperatura mínima osciló entre -1.8 y 9.2 °C, la máxima entre 9 y 19 °C. Enero fue el mes con temperaturas más bajas, mientras que junio registró las más altas.

A escala altitudinal (Figura 22), la abundancia de *D. frontalis* se mantuvo entre los 2,600 y 3,050 msnm, incrementó entre 3,150 y 3,250 msnm, y disminuyó hacia los 3,350 msnm.

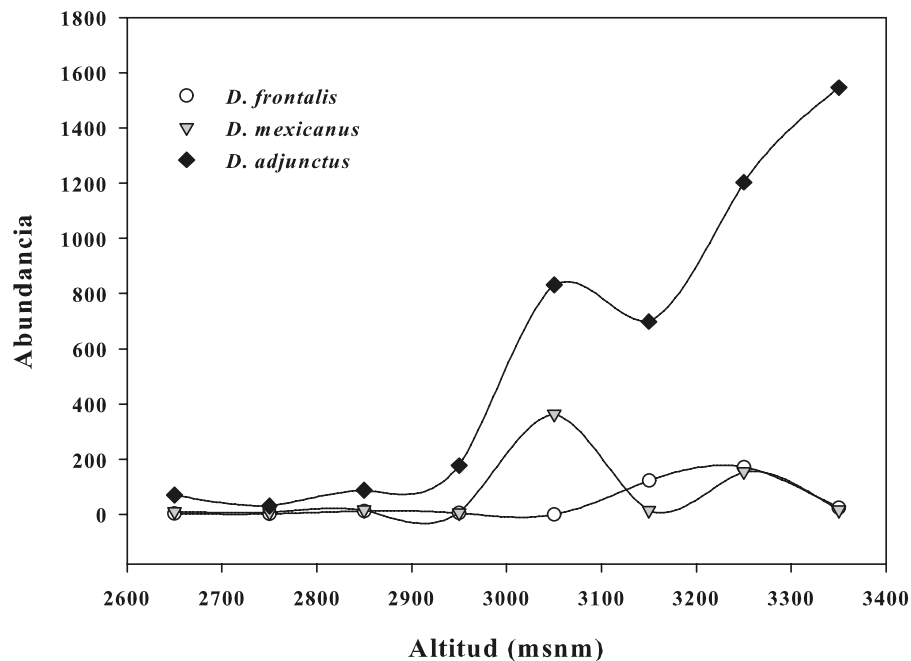
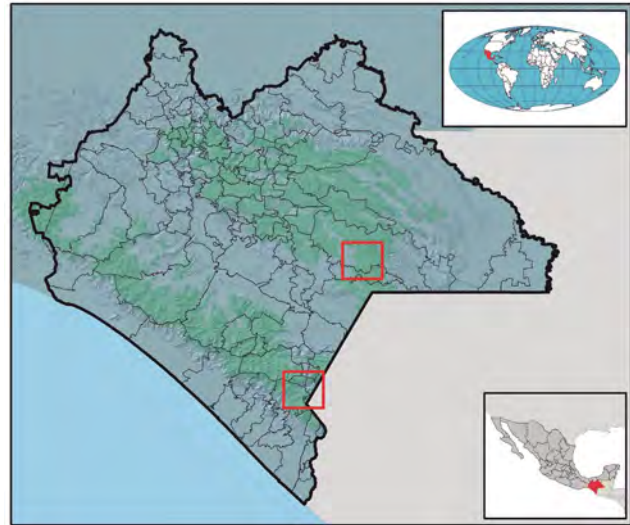


Figura 22. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Coahuila.

De forma más irregular, *D. mexicanus* registró una oscilación entre los 3,050 y 3,250 msnm, y de igual forma que *D. frontalis*, su abundancia disminuyó hacia los 3,350 msnm. Finalmente, *D. adjunctus* mostró un incremento en la abundancia a partir de los 2,950 msnm, con un pico máximo en los 3,350 msnm. A diferencia de *D. frontalis* y *D. mexicanus*, se encontró una correlación lineal simple, fuerte y significativa ($r^2 = 0.87$; $P < 0.001$; $F = 43.82$) entre la abundancia de *D. adjunctus* y el gradiente altitudinal, donde a mayor altitud se observó mayor abundancia de la especie.

3.2.9 Chiapas

En el Estado de Chiapas, se cuantificó una abundancia total de 26,475 ejemplares correspondientes al periodo entre febrero 2015 a diciembre 2016. De las tres principales especies del género *Dendroctonus*, previamente descritas, prácticamente el 100 % de la abundancia total correspondió a *D. frontalis*, y sólo una colecta a *D. adjunctus*, en el mes de junio 2015. Adicional a estas cifras, se cuantificó una abundancia de 26,082 individuos, correspondientes a otras especies como *D. mesoamericanus*, *D. valens*, *D. paralelicollis* y *D. approximatus*; así como a los géneros *Hylastes*, *Hylurgops*, *Pityophthorus* e *Ips*. (Figura 23).



De la especie *D. frontalis*, se colectó un total de 16,334 ejemplares en el primer periodo de muestreo (abril 2015 – marzo 2016), y poco menos de la mitad (7,180 individuos) durante el segundo periodo (abril 2016 – diciembre 2016). A lo largo de ambos periodos, se observaron picos de actividad en los meses de marzo y abril. En general, como se observa en la Figura 23, estos picos de actividad coincidieron con los valores máximos de temperatura registrados en el mes de abril, de 30.3 °C en el primer año, y 29.5 °C en el segundo año. De igual forma, en estas fechas se registraron las temperaturas mínimas más altas, de 22.3 °C en el primer periodo, y de 16.4 °C en el segundo.

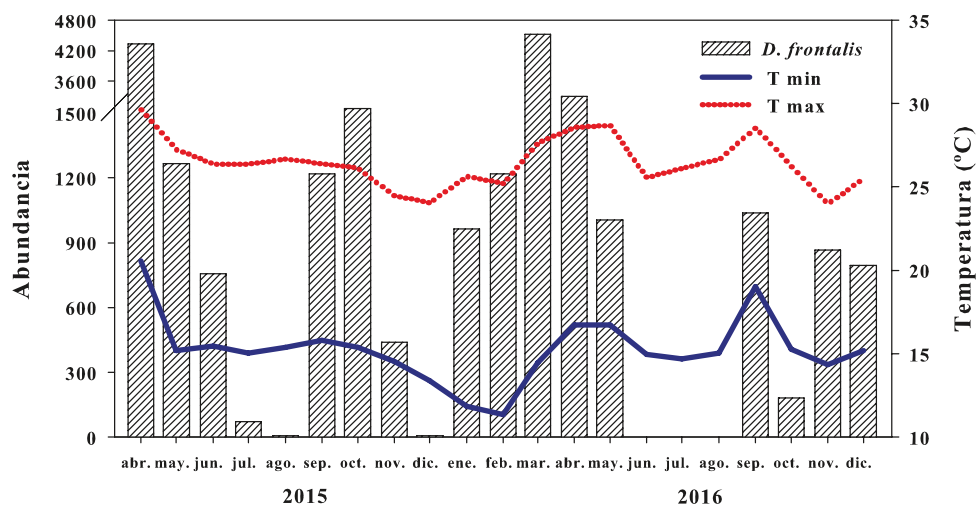


Figura 23. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de Chiapas.

A lo largo del 1^{er} y 2^{do} periodo de muestreo, se registró una temperatura media anual de entre 19.1 y 19.5 °C, respectivamente. Durante el primer periodo, la temperatura mínima promedio osciló entre los 10 y 19 °C, en tanto que la máxima se mantuvo entre los 23 y 29 °C. De forma similar, en el segundo periodo las mínimas se mantuvieron entre 10 y 22 °C, y las máximas entre 23 y 30 °C.

En referencia al gradiente altitudinal, la abundancia de *D. frontalis* disminuyó paulatinamente, desde los 1,430 a 1,810 msnm, posteriormente, la abundancia se mantuvo con variaciones mínimas entre 1,850 y 2,150 msnm. Estos valores se ajustaron significativamente a una regresión polinomial de 2^{do} orden ($r^2 = 0.98$; $P < 0.0001$; $F = 229.05$), en respuesta al gradiente altitudinal.

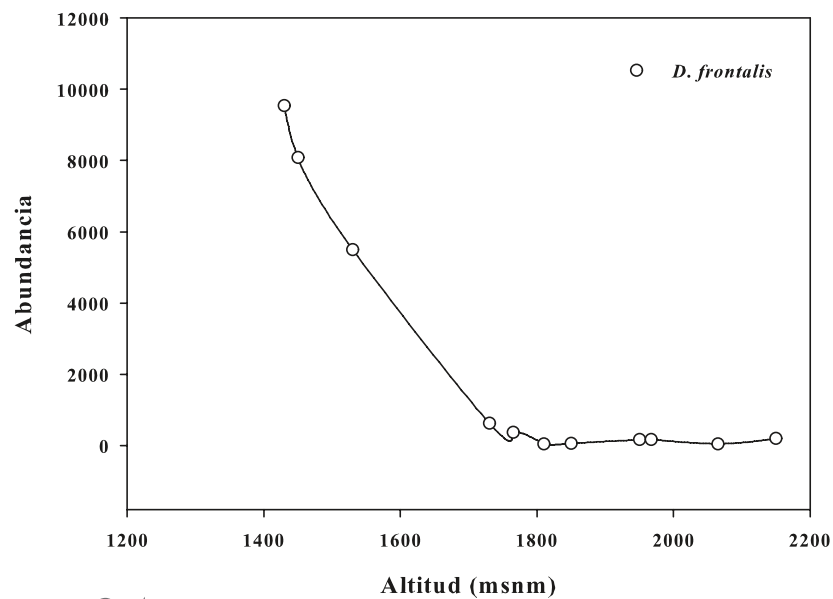
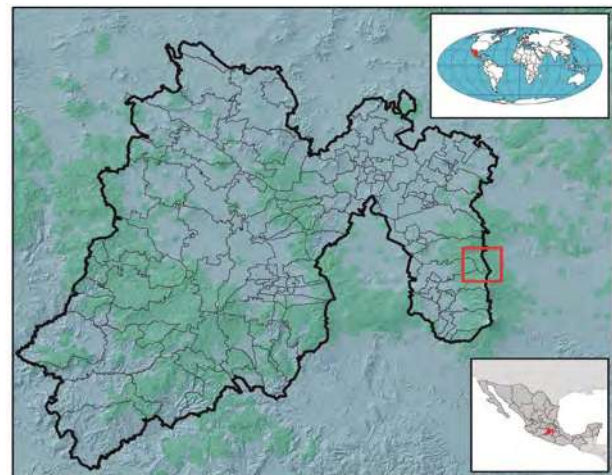


Figura 24. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de Chiapas.

3.2.10 Estado de México

Entre marzo de 2015 y noviembre de 2016 se registró una abundancia total de 2,099 individuos en el sitio ubicado en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, Estado de México. La especie más abundante fue *D. adjunctus*, con alrededor de 2,082 individuos.



En menor medida se encontró *D. frontalis* y *D. mexicanus*, con 15 y 2 individuos, respectivamente. Adicionalmente se encontraron 11,611 individuos, de géneros como *Hylurgops*, *Ips*, *Hylastes* y *Pityophthorus*, entre otros.

Durante el primer año de muestreo (abril 2015 - marzo 2016), se registró más del 90 % de la abundancia total de *D. adjunctus*. Los meses con mayor actividad fueron octubre, noviembre y diciembre (Figura 25). En este mismo año, se colectaron sólo 4 individuos de *D. frontalis*, correspondientes al mes de marzo. Durante el segundo año de muestreo (abril 2016 - marzo 2017), *D. adjunctus* registró una abundancia mensual promedio menor a 10 individuos. Así mismo, *D. frontalis* mostró mayor actividad entre los meses de abril, agosto y septiembre; y *D. mexicanus* tuvo dos registros en el mes de noviembre.

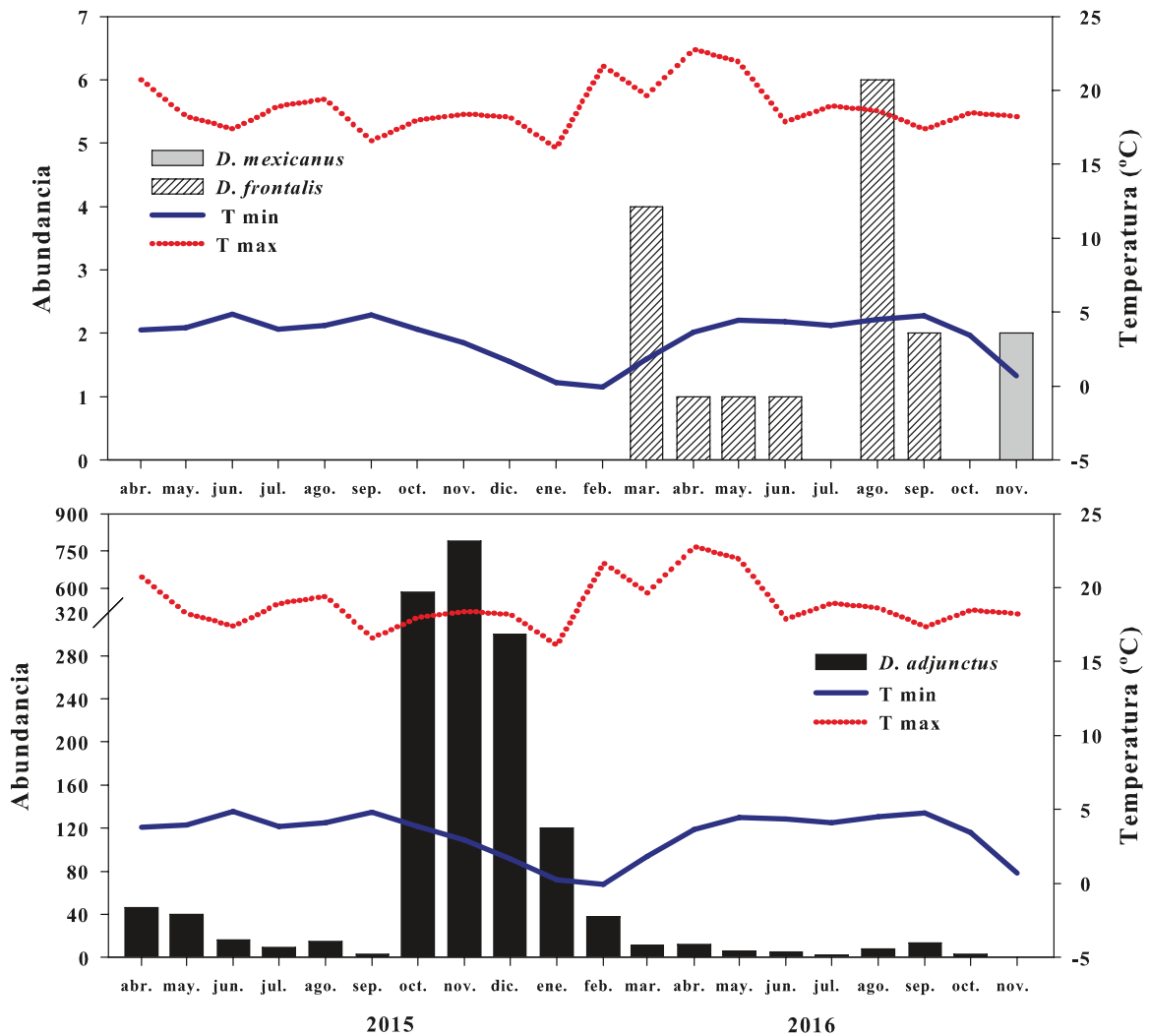


Figura 25. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para el Estado de México.

Respecto a la temperatura, en el primer año, se tuvo una mínima de 3.0 °C, una máxima de 18.5 °C y una temperatura promedio anual de 8.8 °C. En este año, la temperatura mínima quincenal osciló entre -0.8 y 5.2 °C, donde los valores mínimos correspondieron a los meses de enero y febrero. La temperatura máxima quincenal fue de entre 14 y 22 °C con valores máximos en los meses de marzo y agosto. Durante el segundo año la temperatura mínima y temperatura promedio fueron sólo dos centésimas de grado mayor al primer año; mientras que la temperatura máxima fue aproximadamente medio grado más alta, con 19.2 °C. En este año se registraron temperaturas quincenales entre -1.7 y 4.84 °C. y las máximas de 15 a 24 °C. a pesar de las fluctuaciones de temperatura quincenal dentro del sitio, no se encontró una correlación significativa entre el aumento o disminución de la temperatura, con la actividad de las tres especies de *Dendroctonus*.

En cuanto a la abundancia dentro del gradiente altitudinal del sitio, *D. adjunctus* mantiene una oscilación irregular entre los 3,100 y 3,400 msnm, un incremento notable a los 3,500 msnm y finalmente muestra una disminución de 600 a 200 individuos, a los 3,611 msnm (Figura 26). Debido a este comportamiento errático, no se encontró correlación significativa entre la abundancia de la especie, con el gradiente altitudinal del sitio.

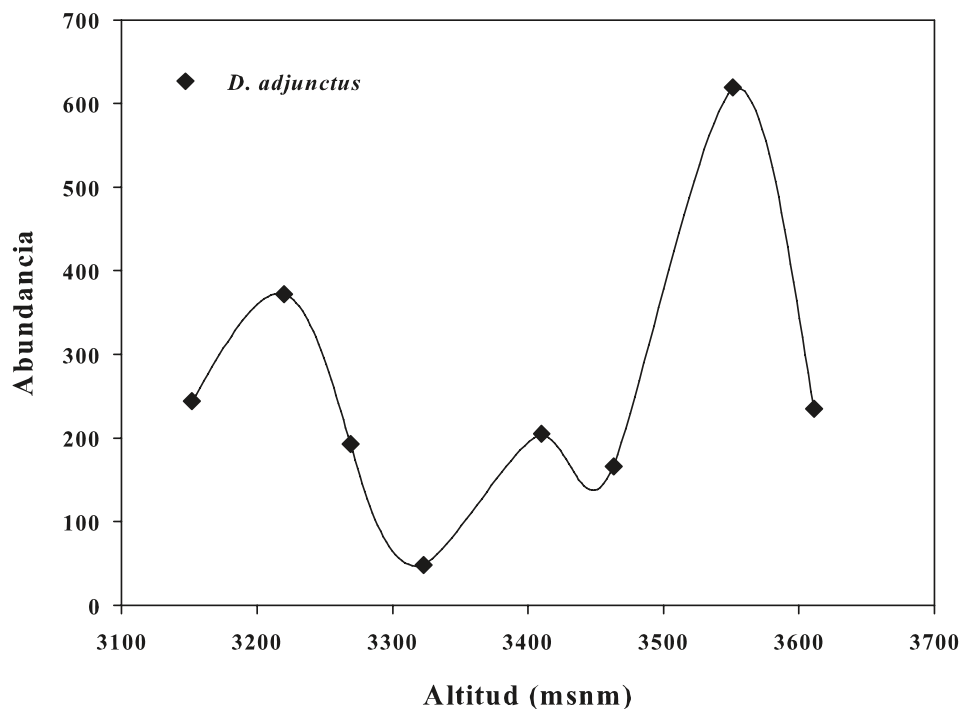
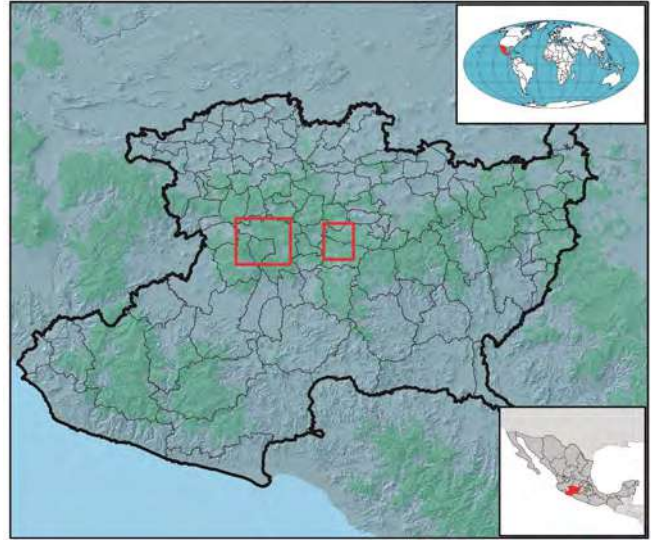


Figura 26. Abundancia altitudinal por especie para el Estado de México.

3.2.11 Michoacán

En el Estado Michoacán, la abundancia de las tres principales especies de *Dendroctonus* fue de 64,302 individuos, colectados durante febrero 2015 y diciembre 2016. De esta cifra, el 4 % corresponde a *D. frontalis*, 95 % a *D. mexicanus*, y 2 % a *D. adjunctus*. Adicional a estas tres especies, se registró una abundancia de 10,258 individuos, correspondientes a especies como *D. approximatus*, *D. valens* y *D. brevicomis*, además de géneros como *Hylastes*, *Pityophthorus*, *Hylurgops* e *Ips*.



Durante el 1^{er} año de muestreo, se colectaron 39,391 individuos, de los cuales el 5 % correspondió a *D. frontalis*, 93 % a *D. mexicanus*, y 2 % a *D. adjunctus*. En los sitios localizados en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, se registró una abundancia total de 21,167 ejemplares: 1,447 de *D. frontalis*, 18,904 de *D. mexicanus*, y 816 de *D. adjunctus*. Se observaron picos de actividad importante entre los meses de abril-junio para *D. frontalis* y *D. mexicanus*. Por su parte, *D. adjunctus* registró un pico máximo de actividad en el mes de junio, y de menor intensidad en mayo, octubre y noviembre (Figura 27).

Respecto a la temperatura, el periodo registró una media anual de 14.4 °C, una mínima de 10.1 °C y una máxima de 22.4 °C. En valores quincenales, la temperatura mínima se mantuvo en un rango de 4.7 a 19.2 °C, y la temperatura máxima entre los 19 y 28 °C. Enero fue el mes con las temperaturas más bajas, mientras que abril tuvo las temperaturas más altas.

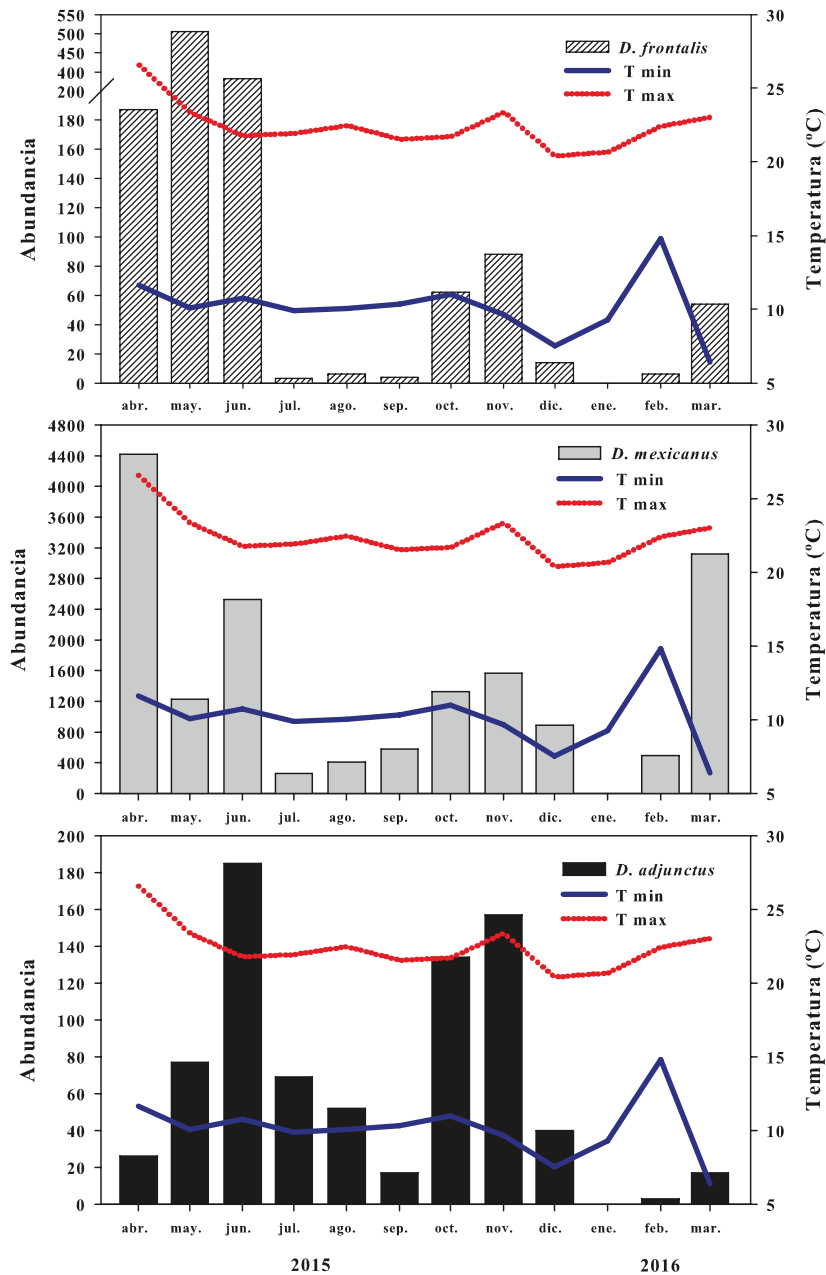


Figura 27. Abundancia temporal por especie de descortezador y la relación con temperaturas extremas para los sitios 1 y 2 de Nuevo San Juan Parangaricutiro, en el Estado de Michoacán.

Respecto al gradiente altitudinal, las tres especies mostraron patrones de abundancia relativamente similares (Figura 28). La abundancia de *D. frontalis* y *D. adjunctus* mostró un comportamiento irregular de mayor actividad *D. mexicanus* entre los 2,086 y 2230 msnm, posteriormente se estabilizó hasta los 2,889 msnm. Por su parte, en *D. mexicanus* se observó un incremento entre 2,086 y 2,150 msnm, a partir del cual disminuyó paulatinamente hasta los 2,889 msnm.

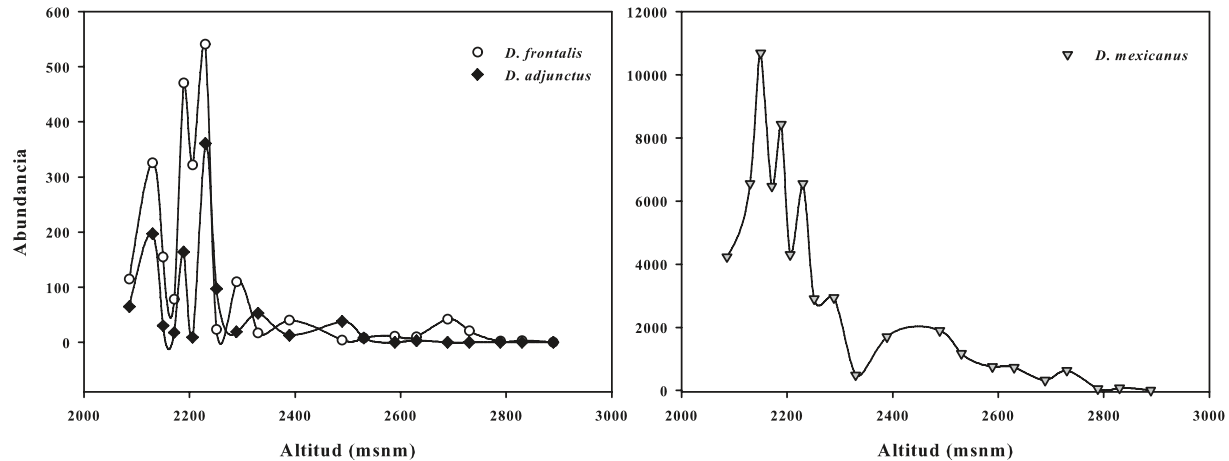


Figura 28. Abundancia altitudinal por especie para los sitios 1 y 2 de Nuevo San Juan Parangaricutiro, en el Estado de Michoacán

A diferencia de *D. frontalis* y *D. adjunctus*, los valores de abundancia de *D. mexicanus* se ajustaron significativamente a una regresión polinomial de 2^{do} orden ($r^2 = 0.70$; $P < 0.0001$; $F = 20.76$), en respuesta al gradiente altitudinal.

3.3 Identificación de descortezadores (genitalias)

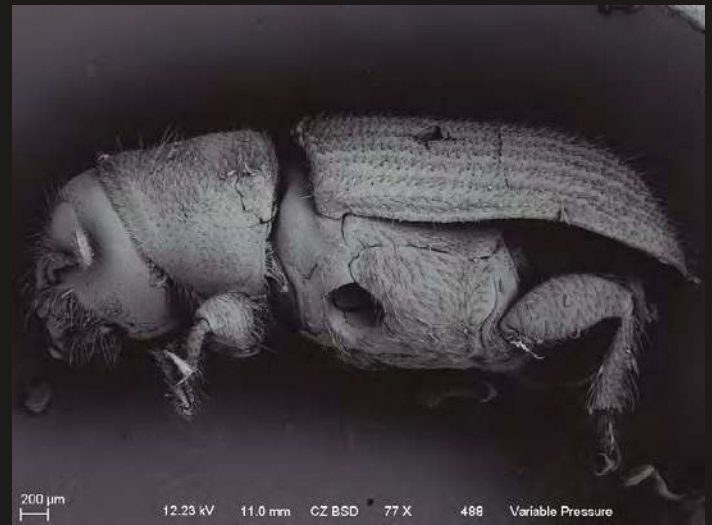
En primera instancia, para la determinación de las especies se observaron caracteres morfológicos externos de los especímenes, para lo cual se utilizó un microscopio LEICA® EZ4 HDaA con magnificación de 35X, lográndose la identificación de especies del grupo *D. frontalis* con las características distintivas para cada especie. En los individuos de *D. mexicanus* se observó la cabeza de forma convexa con dos procesos frontales separados por una ranura epicraneal, que baja por el vertex y llega a la zona frontal media de la cabeza. Presenta además, procesos epistomales elevados, los cuales son muy evidentes en los machos (Fotografía 13), otra característica importante es el declive elitral convexo con setas con más de dos tamaños (Fotografía 15). Para el caso de *D. frontalis*, las características principales de identificación fueron la frente convexa, mostrando dos procesos frontales separados por la ranura frontal que viene desde el epicraneum. Los procesos epistomales son ligeramente menos pronunciados (Fotografía 12). Mientras que en el declive elitral se observa una inclinación moderada, setas abundantes de dos clases de tamaños (Fotografía 14). El estudio de genitalias se realizó para tener certeza de las características que se observaron en un lote de individuos de cada especie de interés de *D. frontalis* y *D. mexicanus*.

Dendroctonus frontalis Zimmermann

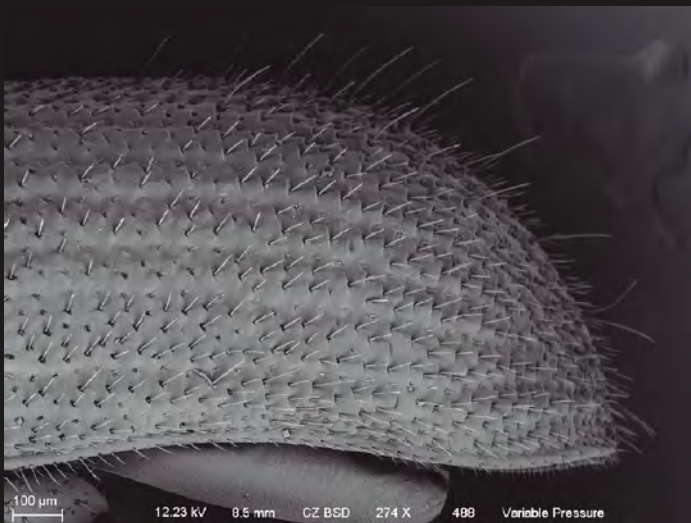


Fotografía 4 Vista lateral izquierda de ejemplar de la especie *D. frontalis*.

Dendroctonus mexicanus Hopkins



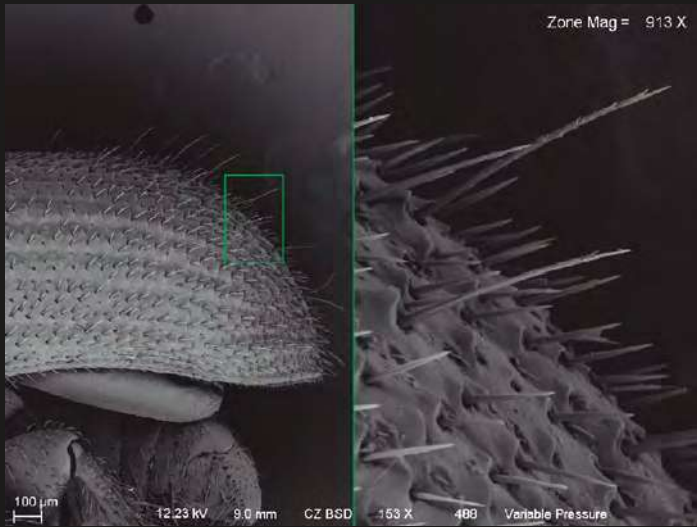
Fotografía 5 Vista lateral izquierda de ejemplar de la especie *D. mexicanus*.



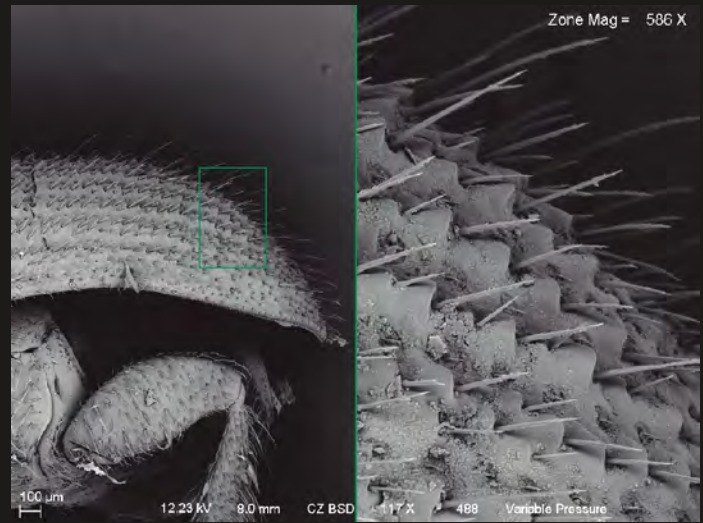
Fotografía 6 Vista dorso-lateral del declive elitral de *D. frontalis*.



Fotografía 7 Vista postero-lateral del declive elitral de *D. mexicanus*.



Fotografía 8 Patrón y tamaño de setas del declive elitral (setas cortas y largas en los espacios interstiales 1 a 3) de *D. frontalis*.



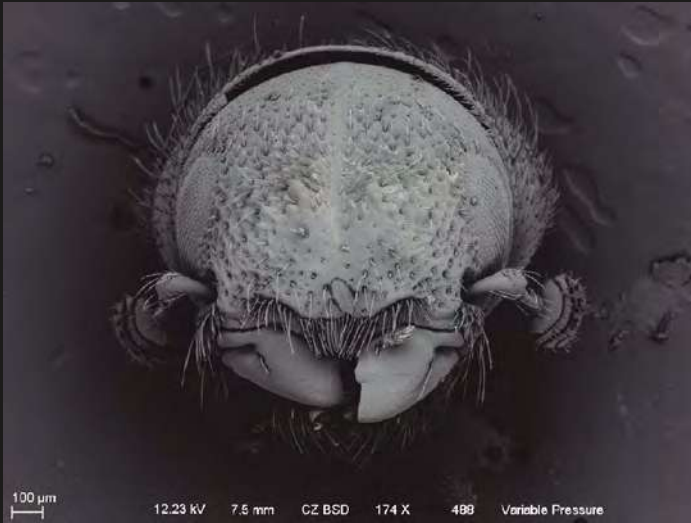
Fotografía 9 Patrón y tamaño de setas del declive elitral (setas cortas, medianas y largas en los espacios interstiales 1 a 3) de *D. mexicanus*.



Fotografía 10 Vista de la región antero-lateral del pronoto y la cabeza de *D. frontalis*.



Fotografía 11 Vista de la región antero-lateral del pronoto de cabeza de *D. mexicanus*.



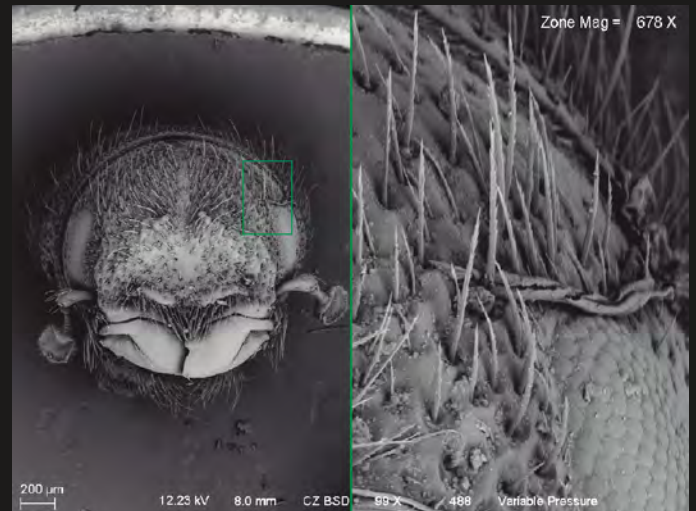
Fotografía 12 Vista frontal de la cabeza de *D. frontalis*, que muestra gránulos y tubérculos prominentes separados por la ranura frontal.



Fotografía 13 Vista frontal de la cabeza de *D. mexicanus* que muestra prominentes tubérculos laterales separados por la ranura frontal.



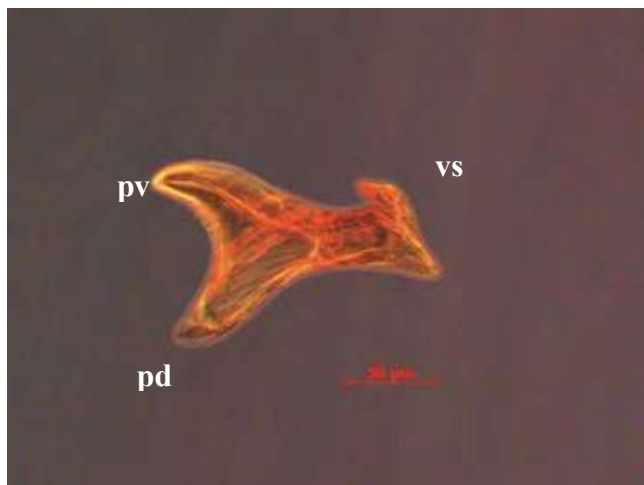
Fotografía 14 Vista frontal de *D. frontalis*, que muestra la superficie por encima de los ojos escasamente granulada.



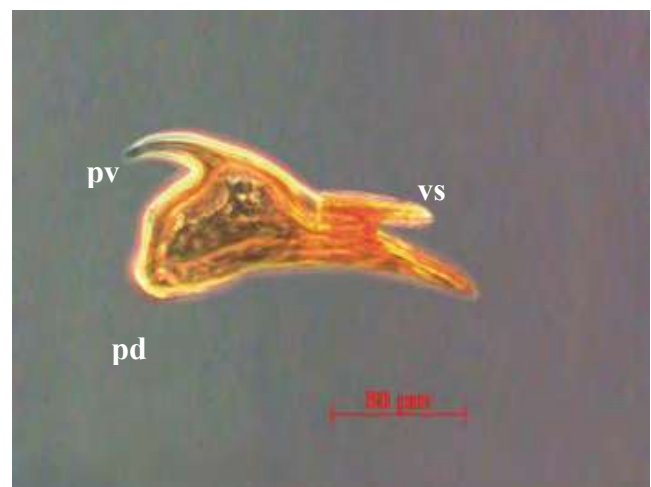
Fotografía 15 Vista frontal de *D. mexicanus*, que muestra la superficie por encima de los ojos puntuada y rugosa.

El estudio presentó una enorme variabilidad de sitios y condiciones, por lo cual la elaboración de laminillas de genitalias de machos fue confirmatoria (técnica de identificación por la genitalia). Para ello, fueron retirados los últimos segmentos abdominales y la genitalia fue extraída, de las genitalias deshidratadas se llevó a cabo la extracción de los conductos seminales y montados en laminilla en posición lateral. La corroboración de las especies se hizo mediante comparación morfológica de los conductos seminales de acuerdo a Hopkins (1909, 1915); Wood (1963, 1982); Bright (1976); Duncan (1987) y Armendáriz-Toledano y Zúñiga (2017). La fotografía fue tomada en microscopio AXIO Imager de Carl Zeiss® con contraste de fases y a 400 aumentos.

El conducto seminal de *D. mexicanus* presenta el proceso ventral obtuso, mientras que el proceso dorsal es más redondeado, el espacio entre ambos es cóncavo formando un arco mientras que la válvula seminal no es tan larga (Fotografía 16). Por otro lado, en *D. frontalis* el proceso ventral es agudo y el proceso dorsal es redondeado en forma de lóbulo y la válvula seminal es más larga (Fotografía 17).



Fotografía 16 Conducto seminal de *Dendroctonus mexicanus* colectado en el estado de Oaxaca. Proceso ventral (vp), proceso dorsal (ps), válvula seminal (vs).



Fotografía 17 Conducto seminal de *Dendroctonus frontalis* colectado en el estado de Hidalgo. Proceso ventral (vp), proceso dorsal (ps), válvula seminal (vs).

3.4 Relación dendrocronología con descortezadores

Una de las series más larga se formó en el estado de Chihuahua con *Pinus arizonica*, esta abarcó 368 años (1647 al 2015), y enseguida la serie generada en Oaxaca con hasta 229 años (Tabla 1). Las series más cortas se obtuvieron en Michoacán (73 años) y Jalisco (85 años). Lo anterior no implica que los bosques de Chihuahua y Oaxaca sean los más longevos, la longitud de la serie dependió de las especies presentes, así como del manejo que se haya dado al bosque en el área de donde se muestrearon los insectos descortezadores, por lo tanto, no es indicador de la longevidad de los bosques.

Tabla 1. Longitud de series dendrocronológicas generadas en los diferentes estados.

Estado	Inicio (año)	Fin (año)	Longitud (años)	Especie
Chihuahua	1647	2015	368	<i>P. arizonica</i>
Durango	1890	2015	125	<i>P. durangensis</i>
Coahuila	1898	2015	117	<i>Pseudotsuga menziesii</i>
Nuevo León	1875	2014	139	<i>P. teocote</i>
Jalisco	1930	2015	85	<i>P. douglasiana</i>
Michoacán	1942	2015	73	<i>P. pseudostrobus</i>
Oaxaca	1786	2015	229	<i>P. rudis</i>
Querétaro	1877	2014	137	<i>P. montezumae</i>
Hidalgo	1887	2015	128	<i>P. pseudostrobus</i>

Se ha demostrado que el Índice del Ancho del Añillo (IAA) de las series dendrocronológicas está relacionado directamente con la cantidad de precipitación; es decir conforme más lluvia ocurrió en ese año, más ancho es el anillo o el valor del IAA es mayor. La línea horizontal en cada figura indica la media de la serie (valor de 1), esto da la pauta para decir que en un periodo por debajo de la media ocurrió sequía, lo cual puede identificarse mejor con la serie suavizada (spline) y esta sequía pudo estar relacionada directamente con la presencia de descortezadores. En este sentido, en la serie más larga (Figura 29), se puede detectar que en los últimos 350 años se han presentado varias sequías en el norte de México. Particularmente en los años 1700, 1800 y 2000, en esta última coinciden varios estados del centro hasta el norte de la república mexicana, los cuales estuvieron indudablemente relacionados con la presencia de plagas forestales.

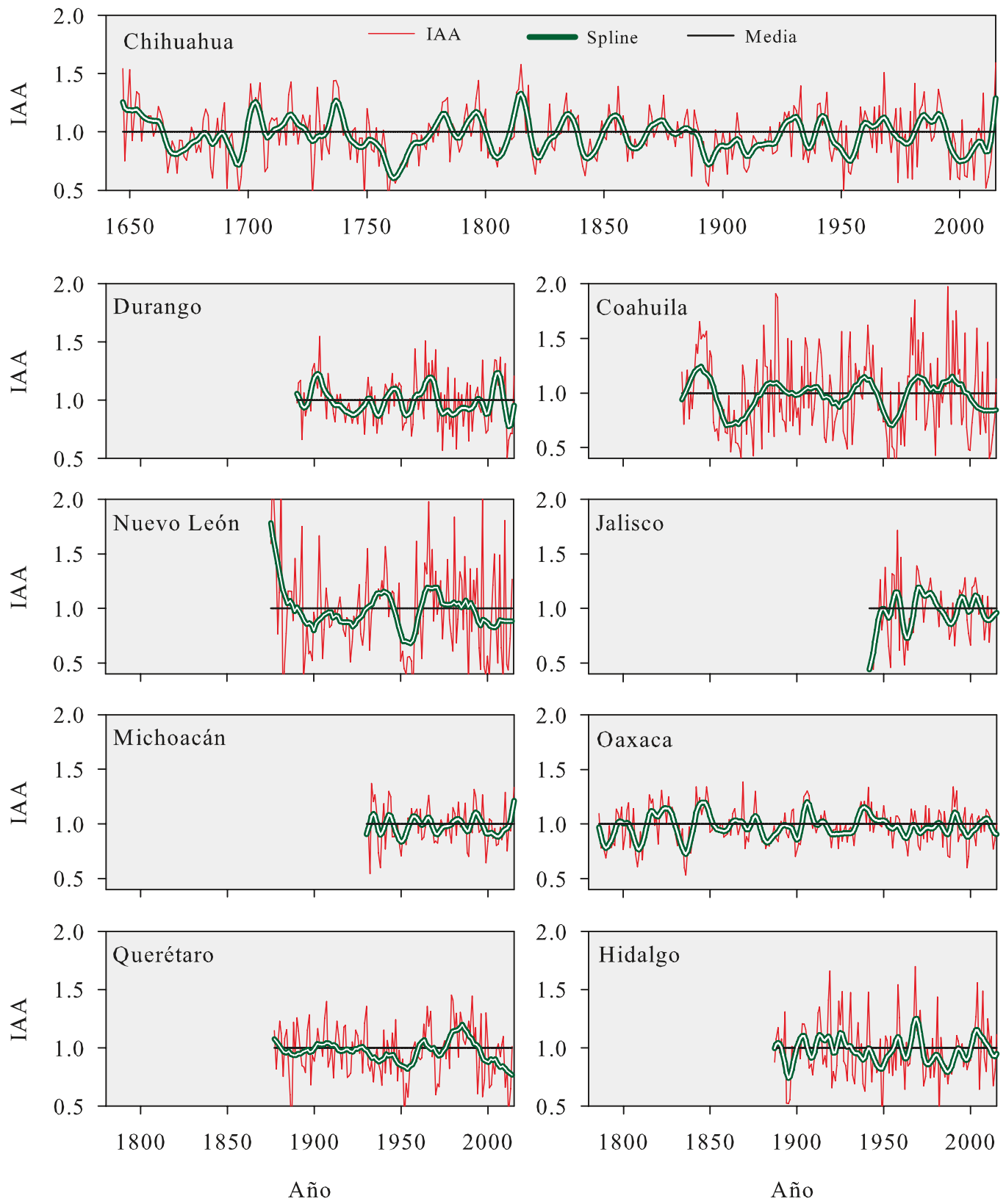


Figura 29. Series dendrocronológicas generadas en diferentes especies de coníferas, en sitios específicos (Figura 2) de varios estados en que se muestreó insectos descortezadores.

Sin embargo, documentar los registros de plagas por insectos descortezadores ha sido una práctica poco usada en México y solo data de los últimos 10 años, en especial desde el 2008. En este tiempo se han tenido casi 36,000 registros, donde 2013 y 2014 fueron los años con mayor número de registros de plagas por descortezadores (Figura 30). Más del 55 % de estos registros ocurrieron en Michoacán, después en Chihuahua (14.3 %) y en Querétaro (9.5 %) (Tabla 2).

Es importante aclarar que el mayor número de registros de plagas en ciertos estados del país no es necesariamente que haya más plagas, ni tampoco más o menos severa, es posible que el registro de la plaga se haya hecho en una misma área, predio o ejido, pero en diferentes tiempos, incluso dentro de un mismo año.

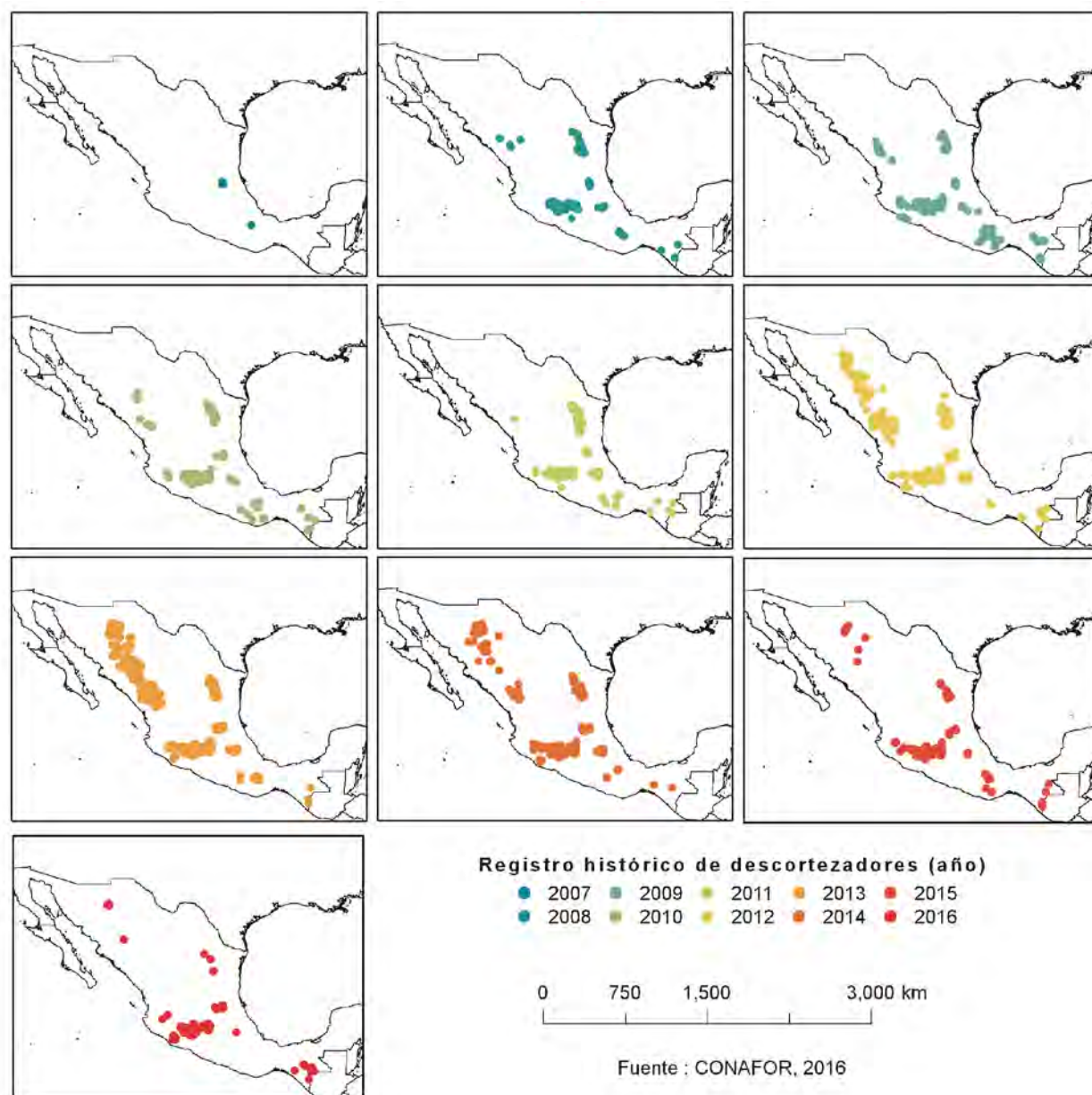


Figura 30. Distribución geográfica de descortezadores (2007 - 2016) en México en los últimos 10 años.

Tabla 2. Registros históricos de plagas por insectos descortezadores en México.

Año	Chis.	Chih.	Cd. de Méx.	Col. Dgo.	Jal.	Mich.	Méx.	N. L.	Oax.	Qro.	S. L. P.	Son.	Tamps.	Tlax.	Total	
2007								2	4						6	
2008	20			12		221		323	8	48				17	649	
2009	95			23	52	1033		198	346	303				58	2108	
2010	76		2	49	14	1060		221	103	186				28	1739	
2011	92		12	6	8	857		271	25	177				88	1536	
2012	46	1700	15	18	605	124	2043	8	292	3	527			259	5640	
2013	29	2480	83	1040	67	4384	30	459	190	1295	4		5	183	10249	
2014	6	750	4	235	90	5231	28	286	111	606				110	7457	
2015	44	146	12		128	3214	39	146	521	120		16			4386	
2016	91	45	12		22	1766		14		130		8		4	2092	
Total	499	5121	140	18	1970	505	19809	105	2210	1309	3396	4	24	5	747	35862

3.5 Mapas de distribución potencial del género *Dendroctonus* spp

Los resultados presentados muestran la modelación de la distribución potencial de descortezadores a nivel género, utilizando tres tipos de variables: a) climáticas, b) dasométricas-topográficas y c) el conjunto de las tres anteriores. El mayor número de registros de descortezadores (*Dendroctonus* spp.) detectados en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2009 - 2014) se observaron en los estados de Durango (36), Chihuahua (34) y Oaxaca (31) (Figura 31). Se utilizó la base de datos del INFyS debido a que estos registros están más uniformemente distribuidos, no así los históricos que se reportan a distancias mínimas (metros) entre un registro y otro.

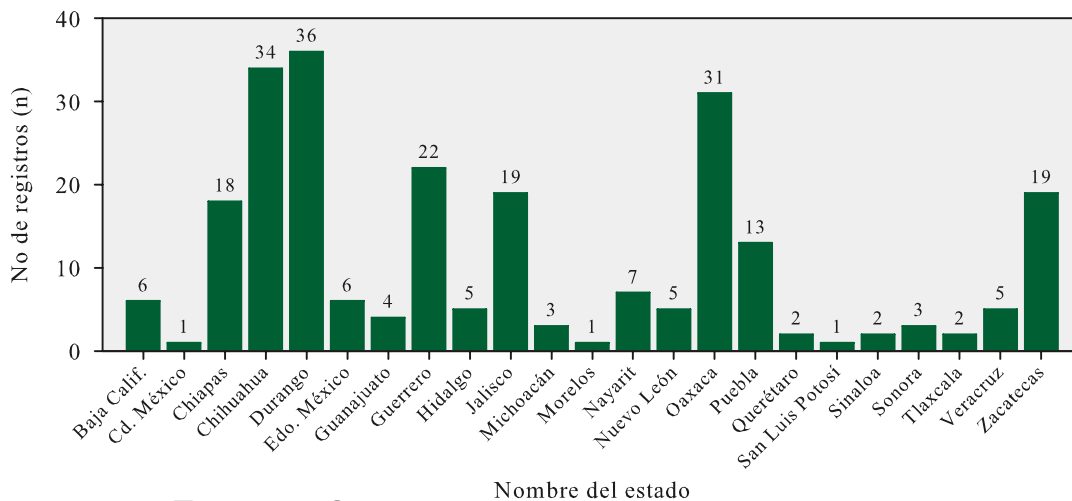


Figura 31. Número de registros de *Dendroctonus* spp., acorde a información del inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2009 - 2014.

Según la modelación con variables climáticas, los resultados indican que la temperatura máxima del mes de mayo, contribuye de forma importante a predecir la distribución del género *Dendroctonus*, así también como las temperaturas extremas (mayores a 35 °C). Al modelar descortezadores con variables del bosque (dasométricas) más topografía, se puede notar que el diámetro de copa de los árboles, la pendiente del terreno, altura de los árboles y el número de especies de pino, determina en gran medida la distribución geográfica de *Dendroctonus* (Tabla 3).

Como resultado del modelo de distribución de descortezadores, se observó que las variables más importantes (elevado porcentaje en el modelo) que determinan la distribución de las especies son: las altas temperaturas del mes de mayo (> a 35 °C), la pendiente y las lluvias mayores a 10 mm durante el mes de julio (Tabla 4). Desde un punto de vista práctico, se considera esta última modelación como la más adecuada, en virtud de que se incluyen tanto variables climáticas, del bosque y topográficas.

Según se observa, variables como diámetro de copa y área basal, también son importantes para modelar la distribución de esta plaga.

Tabla 3. Contribución de variables climáticas, dasométricas y topográficas en la generación de modelos de distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en México.

a) Modelo con variables climáticas		b) Modelo con variables dasométricas y topográficas		c) Modelo con climáticas, dasométricas y topográficas	
Variable	Contribución (%)	Variable	Contribución (%)	Variable	Contribución (%)
Tmax_05	33.60	Acp	19.00	Tm40_05	20.50
Tm35_05	12.00	Pe	18.90	Tm35_05	18.30
ND _{sll} _07	8.50	Hp	12.00	Pe	14.60
Tm40_05	7.50	Nsp	11.50	ND ₁₀ _07	8.00
ND ₁₀ _07	7.10	Al	10.90	Acp	5.50
DE_04	6.60	Ex	9.30	Ab	5.40
-	-	Na	7.30	Ex	4.70
-	-	Acs	4.80	Hp	4.00
-	-	Dnp	3.70	ND _{sll} _07	3.40
-	-	Ab	2.80	Tm35_05	3.30
-	-	-	-	Dnp	3.20
-	-	-	-	Tmax_05	3.00
-	-	-	-	Nsp	2.80
-	-	-	-	Na	2.30
-	-	-	-	Al	0.90
-	-	-	-	Acs	0.10

Donde: Tmax = Temperatura máxima del mes *i* (°C), Tm₃₅ = Temperatura media del mes *i* con ND₃₅ (°C), ND_{sll} = Número de días sin lluvia del mes *i* (n), Tm₄₀ = Temperatura media del mes *i* con ND_{≥40} (°C), ND₁₀ = Número de días del mes *i* con lluvias ≥ a 10 mm (n), DE = Desviación estándar de temperatura máxima del mes *i* (°C), Nsp = número de especies (N), Na = número de árboles (N ha⁻¹), Dnp = diámetro normal promedio (cm), Hp = altura promedio de los árboles (m), Ab = área basal (m² ha⁻¹), Acp = área de copa promedio (m² ha⁻¹), Acs = suma del área de copa (m² ha⁻¹), Al = altitud (m), Pe = pendiente (°), Ex = exposición (°), 01, 02, ..., 012 = meses del año de enero a diciembre respectivamente.

Tabla 4. Rango de valores de variables climáticas, dasométricas y topográficas que determinan la distribución de descortezadores en México.

	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
ND _{P10} _07	0.02	17.01	9.57	9.78
ND _{sil} _07	7.85	30.32	14.71	14.15
DE_04	5.08	6.80	5.95	5.86
Tm ₃₅ _05	14.72	36.21	27.60	26.96
Tm ₄₀ _05	27.26	36.56	7.74	6.27
Tmax_05	26.08	37.19	32.56	32.14
Al	724.00	3930.00	2136.28	2259.00
Pe	0.18	19.99	5.74	4.73
Ex	1.77	359.36	171.60	171.45
Hp	4.89	18.27	10.73	10.77
Nsp	1.03	3.83	1.54	1.32
Dnp	14.18	40.61	22.19	21.22
Ab	2.05	12.14	5.97	6.17
Acp	0.39	4678.73	406.46	399.73
Na	75.88	278.37	135.60	125.46

3.6 Modelos de distribución actual de descortezadores en México

El mapa de registros de descortezadores muestra mayor densidad de puntos en la SMOc (Sierra Madre Occidental), debido a la mayor densidad de sitios distribuidos para el INFyS, que a su vez obedecen a una mayor cobertura forestal de coníferas en esta parte del país (Figura 32). La modelación de *Dendroctonus* spp., con variables climáticas (Figura 33), del bosque (Figura 34) y todas en conjunto (Figura 35) son muy similares, especialmente estas dos últimas.

La mayor probabilidad de ocurrencia de descortezadores se observa en la SMOc y en los bosques distribuidos en el Eje Neovolcánico. Según se observa, gran parte de la cubierta de los bosques de los estados de Chihuahua y Durango, tienen condiciones climáticas y boscosas idóneas para la presencia de descortezadores, así también como algunos estados del centro del país como Querétaro y Michoacán, incluso del sur, en Oaxaca y Chiapas.

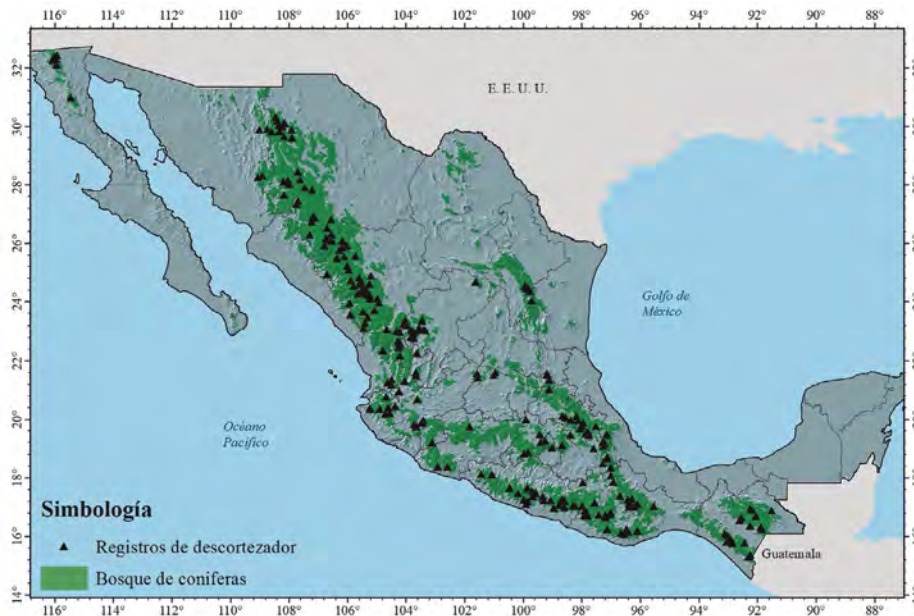


Figura 32. Distribución geográfica de registros de *Dendroctonus* spp., en México (Inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2009 - 2014).

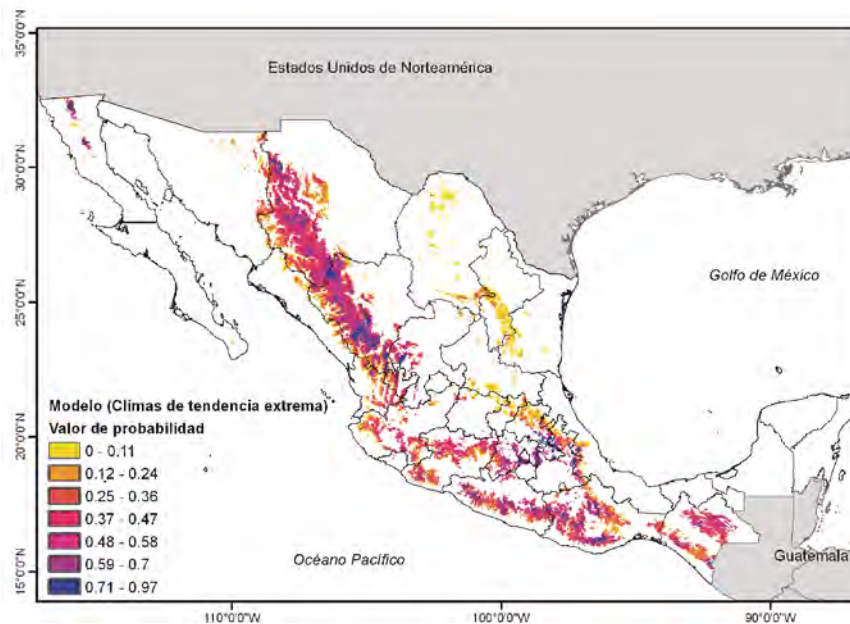


Figura 33. Modelo de distribución potencial actual de *Dendroctonus* spp., en México, utilizando 30 variables climáticas (Acotado a zona de bosque).

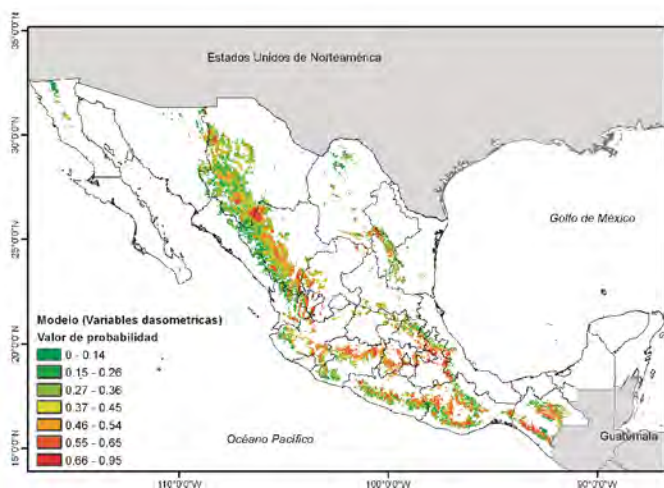


Figura 34. Modelo de distribución potencial actual de *Dendroctonus* spp., en México, utilizando variables dasométricas.

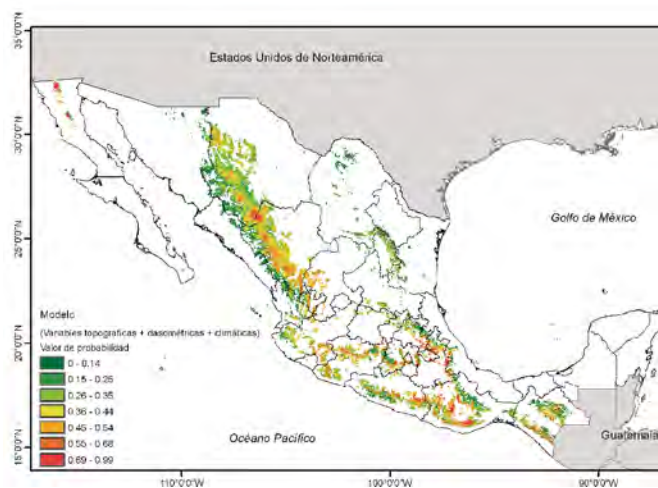


Figura 35. Modelo de distribución potencial actual de *Dendroctonus* spp., en México, utilizando variables climáticas, dasométricas y topográficas.

A partir de los modelos de distribución potencial, generado por el total de variables, se estima un modelo de riesgo representado por una escala (1 al 5), donde el valor más elevado representa la mayor probabilidad de ataque de insectos descortezadores (Figura 36).

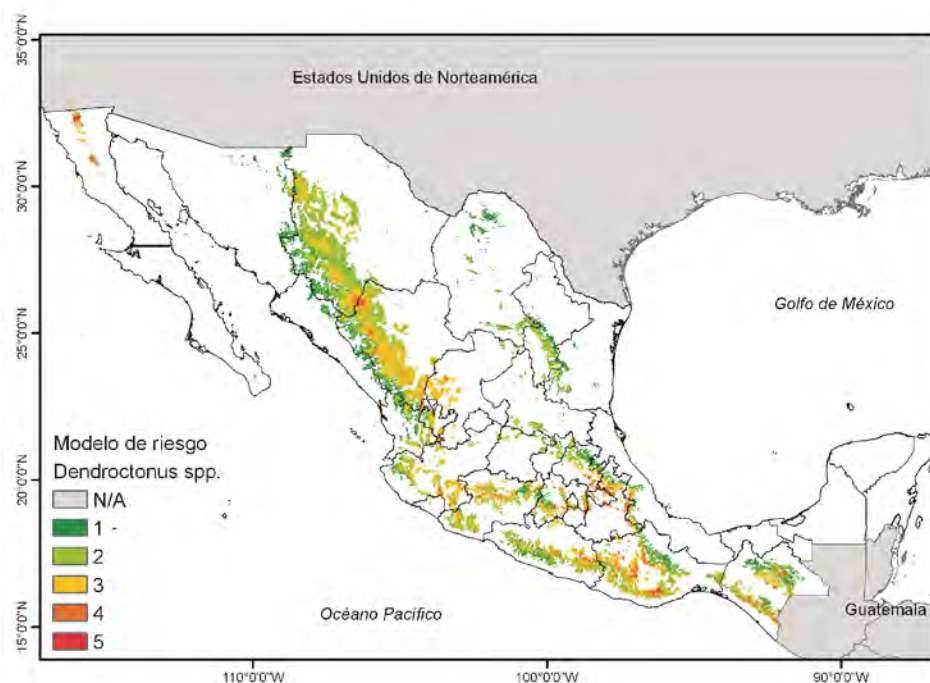


Figura 36. Modelo de riesgo de *Dendroctonus* spp., en México. Valores más altos indican mayor riesgo por ataque de descortezadores.

Se observa en dicho modelo de riesgo, que la mayoría de los bosques de coníferas pertenecientes a al Sierra Madre Occidental y al Eje Neovolcánico, (entre el 40 y 60 % de probabilidad) y solo algunas regiones en particular dentro de los Estados de Oaxaca, Chiapas, Chihuahua y Durango, serán los más vulnerables al ataque de descortezadores si se presentan las condiciones de sitio y climáticas idóneas para dicho fin.

3.7 Modelos de proyección de distribución futura de descortezadores en México

Como se puede observar, la modelación de *Dendroctonus* spp., con variables climáticas, dasométricas y topográficas, difiere un poco a la modelación generada con variables Bioclim (Figura 37). Ésta última arroja áreas de mayor probabilidad, pero no toma en cuenta la dasometría del área. Los forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones (RCP's) que se utilizaron para modelar la distribución actual y futura de *Dendroctonus* fueron: 1) RCP45 (emisiones bajas) al futuro (2050 y 2070) y 2) RCP85 (emisiones altas) al futuro (2050 y 2070). En este sentido se observa que la probabilidad de ocurrencia de *Dendroctonus* predicha con el escenario RCP45 al 2050 (Figura 38) y 2070 (Figura 39) es muy similar; no obstante las superficies predichas al futuro parecen disminuir comparado con lo que existe actualmente (Figura 37).

Usando el escenario con emisiones altas RCP85 (Figura 40 y 41) la superficie predicha con riesgo de descortezador se minimiza aún más comparado con RCP45, en especial para el 2070 (Figura 39).

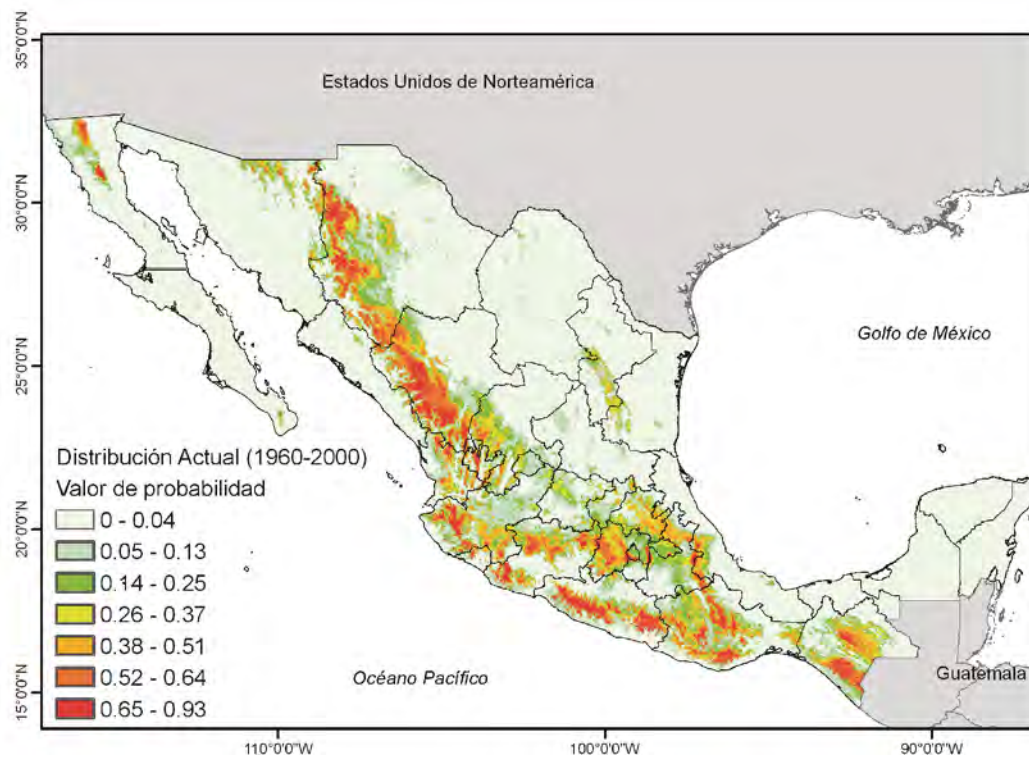


Figura 37. Modelo de distribución potencial actual de *Dendroctonus* spp., en México, utilizando 19 variables Bioclim.

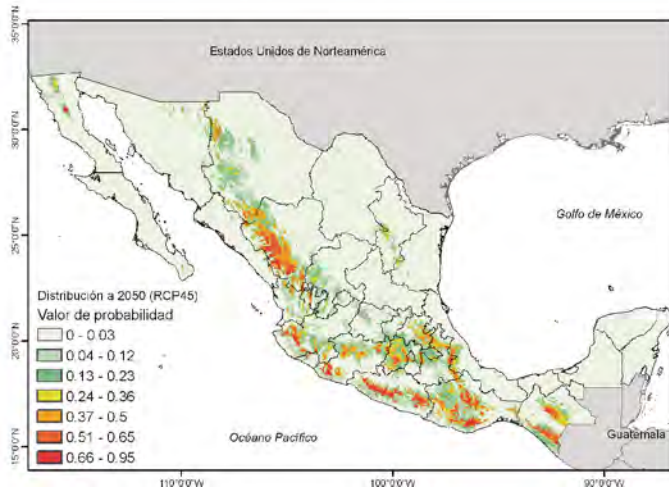


Figura 38. Proyección de la distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en 2050 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP45.

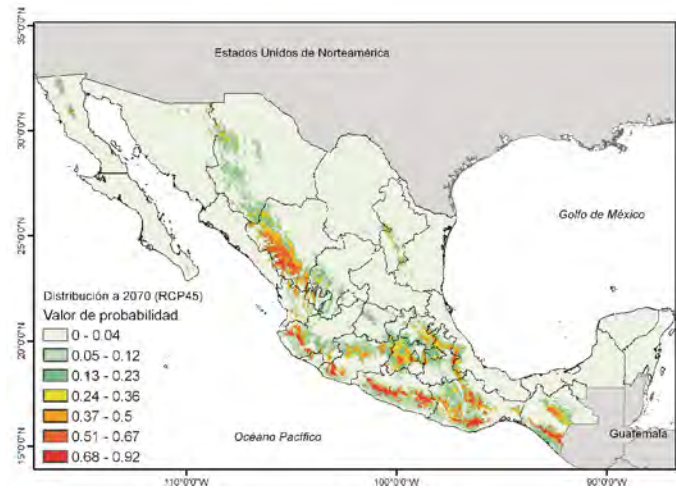


Figura 39. Proyección de la distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en 2070 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP45.

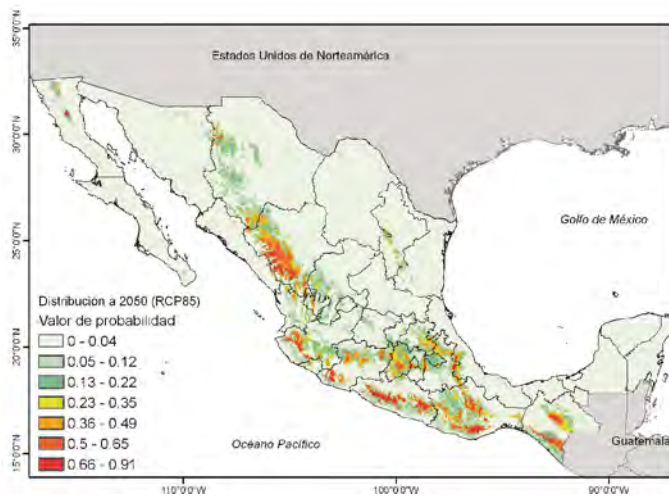


Figura 40. Proyección de la distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en 2050 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP85.

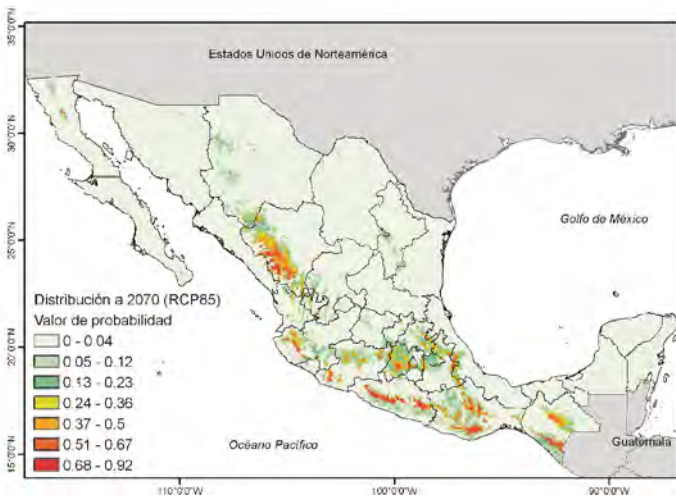


Figura 41. Proyección de la distribución potencial de *Dendroctonus* spp., en 2070 en México, utilizando 19 variables Bioclim. Escenario RCP85.

Con los resultados del estudio es posible observar que los modelos de distribución potencial a futuro indican un cambio importante en el rango de distribución de las especies de *Dendroctonus* spp. A simple vista, se observa una disminución en la superficie ocupada por las especies, tanto en escenarios con bajas, como con altas emisiones. Sin embargo, es necesario considerar que, como resultado directo del cambio climático modelado, se prevé una disminución en la cobertura de los bosques. Se puede asumir entonces que bajo los modelos probados, no hay un cambio positivo en la disminución de probabilidad de ocurrencia de los descortezadores dentro del país. Es decir, se mantienen las mismas proporciones de ocurrencia, simplemente el área de la cobertura vegetal en los escenarios futuros es menor, en comparación con el escenario actual.

4. Conclusiones

Abril y mayo, son los meses en que se registra el mayor número de insectos descortezadores de *D. mexicanus* y *D. frontalis*, por el contrario de noviembre a enero ocurre la menor abundancia, donde la altitud preferente oscila alrededor de los 2500 msnm. Las altas temperaturas, poca precipitación pero sobretodo la existencia de especies hospederas en el rodal determina la abundancia de esta plaga. Las sequías históricas identificadas mediante técnicas dendrocronológicas en las diferentes especies de coníferas, coinciden con los mayores registros de presencia de descortezadores, en especial en el centro y norte del país. Mediante modelos de predicción se han identificado puntualmente áreas idóneas para la ocurrencia de descortezadores, así como las variables climáticas y dasométricas que determinan su distribución. El uso de variables o superficies climáticas a escala mensual, da la pauta para determinar de manera más específica qué variable y en qué periodo del año, es determinante para la distribución o presencia de descortezadores en México. Acorde a escenarios climáticos futuros, se estima que la superficie plagada por descortezador en México, podría disminuir. Estas predicciones son basadas únicamente en variables climáticas, por ende la modelación con variables climáticas, dasométricas y topográficas, es también de suma importancia.

5. Bibliografía

Aguirre, G. J., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 875-882.

Armendáriz-Toledano, F., & Zúñiga, G. (2017). Illustrated Key to Species of Genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Curculionidae) Occurring in Mexico and Central America. *Journal of Insect Science*, 17(2), 34.

Armendáriz-Toledano, F., Niño, A., Sullivan, B. T., Macías-Sámamo, J., Víctor, J., Clarke, S. R., & Zúñiga, G. (2014). Two species within *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae): evidence from morphological, karyological, molecular, and crossing studies. *Annals of the Entomological Society of America*, 107(1), 11-27.

Bright Jr, D. E. (1976). The insects and arachnids of Canada. Part 2. The bark beetles of Canada and Alaska. Coleoptera: Scolytinae. The insects and arachnids of Canada. Part 2. The bark beetles of Canada and Alaska. Coleoptera: Scolytinae.

Carroll, A. L., Taylor, S. W., Régnière, J., & Safranyik, L. (2003). Effect of climate change on range expansion by the mountain pine beetle in British Columbia. In *Pages 223-232 in TL Shore et al.(eds) Mountain Pine Beetle Symposium: Challenges and Solutions, Oct. 30-31, 2003. Kelowna BC. Natural Resources Canada, Information Report BC-X-399, Victoria.*

Cibrián T. D., Méndez M. J. T., Campos B. R., Tate III H. O. & Flores L. J. E. (1995). Insectos Forestales de México/Forest Insects of México. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México. 453 p.

Cook, E. R., & Holmes, R. L. (1984). *Program ARSTAN user's manual*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson.

Cook, E. R., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 45-53.

Cuéllar-Rodríguez, G., Equihua-Martínez, A., Villa-Castillo, J., Estrada-Venegas, E. G., Méndez-Montiel, T., & Romero-Nápoles, J. (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides* Zucc., atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 42-49.

Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437.

Duncan, B. (1987). Illustrated guide to the identification and distribution of the species of *Dendroctonus* Erichson (Coleoptera: Scolytinae) in British Columbia. Journal of the Entomological Society of British Columbia.

Fritts, H.C. (1991). Reconstructing largescale climatic patterns from tree-ring data. University of Arizona Press, Tucson. 286 pp.

Fritts, H.C. (2001). Tree rings and climate. Blackburn Press, Caldwell, New Jersey.

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.

Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, 43: 69-78.

Hopkins, A. D. (1909). Practical information on the Scolytid beetles of North American forests. I. Bark-beetles of the genus *Dendroctonus* (Vol. 83). Govt. print. off.

Hopkins, A. D. (1915). A new genus of scolytoid beetles. Journal of the Washington Academy of Sciences, 5(12), 429-433.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Stocker, T. F., D. Qin, G-K. Plattner, M. M. B. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. 204 pp.

Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Formayer, H., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., Juroch, J. & Možný, M. (2010). Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central European region. *Climate Research*, 44(1), 95-105.

Macías-Sámamo, J.E. y Niño A. (2016). Protocolo para monitoreo de descortezadores de coníferas mediante el uso de semioquímicos, México y Centroamérica. USDA-FS-IP and ECOSUR. 39 p.

Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1.

Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 37, 637-669.

- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231-259.
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana*, (72), 1-16.
- Salinas-Moreno, Y., Vargas, M. C. F., Zúñiga, G., Victor, J., Ager, A., & Hayes, J. L. (2010). Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género *Dendroctonus* (Curculionidae: Scolytinae) en México. *Instituto Politécnico Nacional, Comisión Nacional Forestal, México DF*. 90 p.
- Sánchez S., J. A., & L. M. Torres E. (2007). Biología y hábitos del descortezador *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y estrategias de control en *Pinus teocote* en Nuevo León. CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Núm. 29 Coahuila, México. 35 p.
- Sánchez González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques*, 14: 107-120.
- Soto Correa, J. C., Lindig-Cisneros, R., & Sáenz-Romero, C. (2014). *Lupinus elegans* kunth assisted migration in common garden field tests. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(2), 107-116.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago. IL. USA. 73 pp.
- Triplehorn, C. A. J., Borror, N. F., Triplehorn, D. J. C. A., & Johnson, N. F. (2005). *Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects*. 7th Edition. Saunders College Publishing. 864 p.
- Villanueva D., J., Cerano P., L. Vázquez S., D. W. Stahle, P. Z. Fulé, L. L. Yocom, O. Franco R. y J. A. Ruiz C. (2015). Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5-14.
- Wood, S. L. (1982). The bark and ambrosia beetles of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae), a taxonomic monograph. *Great Basin Naturalist Memoirs*, 6, 1-1356.
- Wood, Stephen L. (1963). A revision of the bark beetle genus *Dendroctonus* Erichson (Coleoptera: Scolytidae), *Great Basin Naturalist*: Vol. 23: No. 1, Article 1
- Zúñiga, G., Cisneros, R., & Salinas, Y. (1995). Coexistencia de *Dendroctonus frontalis* Zimmermann y *D. mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Scolytidae) sobre un mismo hospedero. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, (64), 59-62.

