

Condiciones cálidas y secas como detonantes de brotes de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins

Warm and dry conditions as triggers of *Dendroctonus mexicanus* Hopkins Outbreaks

Julio Nemorio Martínez-Sánchez¹ , Tereza Cavazos² , Ángel Mario Reyna-González¹ , Reynaldo De-León-Valladares¹ , Gerardo Cuéllar-Rodríguez^{1*} 

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional, No. 85, Km 145, CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Ensenada-Tijuana, No. 3918, Zona Playitas, CP. 22860. Ensenada, Baja California, México.

*Autor de correspondencia: luis.cuellarrd@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 03 de septiembre 2024

Aceptado: 26 de noviembre 2025

RESUMEN. Se evaluó la asociación de *Dendroctonus mexicanus* con las fases cálidas y frías de las oscilaciones El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), así como su relación con la superficie infestada y las variables temperatura media, máxima, mínima y precipitación en bosques de *Pinus cembroides* de Aramberri, Nuevo León, durante 2015–2020. La superficie afectada se estimó mediante reportes oficiales y la delimitación en Sentinel-2 mediante clasificación no supervisada y fotointerpretación. Series mensuales de temperatura y precipitación, junto con SOI, PDO y AMO, se analizaron con correlaciones de Pearson con desfases de 0-11 meses ($\alpha = 0.05$) y compuestos por fase. La afectación acumulada fue 2 058.4 ha; 2017 concentró 1 054.71 ha (51.2 %), bajo el efecto de La Niña 2016-2017 y PDO negativa. Los meses con afectación presentaron Tmax de 25.8-29.2 °C (mediana \approx 27.1 °C) y Tmin de 14.7-17.9 °C (mediana \approx 17.3 °C). Tmax se asoció positivamente con SOI y negativamente con PDO; Tmin mostró correlaciones negativas más débiles con PDO. La precipitación presentó asociaciones aisladas y de baja magnitud y AMO no mostró señal relevante. La mayor afectación ocurrió en primavera-verano y se distribuyó en brotes discretos concentrados hacia el límite árido del Altiplano.

Palabras clave: Insectos descortezadores, *Pinus cembroides*, oscilaciones climáticas, cambio climático, bosque templado.

ABSTRACT. The association of *Dendroctonus mexicanus* with the warm and cold phases of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), the Pacific Decadal Oscillation (PDO), and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) was evaluated, along with its relationship with infested area and the variables: mean, maximum, and minimum temperature, and precipitation in *Pinus cembroides* forests of Aramberri, Nuevo León, during 2015–2020. The affected area was estimated using official reports and Sentinel-2 delineation through unsupervised classification and photointerpretation. Monthly temperature and precipitation series, together with SOI, PDO, and AMO, were analyzed using Pearson correlations with lags of 0–11 months ($\alpha = 0.05$) and phase-based composites. Total affected area was 2,058.4 ha; 2017 accounted for 1 054.71 ha (51.2%), under the influence of the 2016–2017 La Niña episode and negative PDO. Months with infestation exhibited Tmax values of 25.8–29.2 °C (median \approx 27.1 °C) and Tmin of 14.7–17.9 °C (median \approx 17.3 °C). Tmax correlated positively with SOI and negatively with PDO, while Tmin showed weaker negative correlations with PDO. Precipitation exhibited isolated significant associations, and AMO showed no relevant signal. Most infestation occurred in spring summer and was distributed in discrete outbreaks concentrated near the arid boundary of the Mexican Altiplano.

Keywords: Bark beetles, *Pinus cembroides*, climate oscillations, climate change, temperate forest.

Como citar: Martínez-Sánchez JN, Cavazos T, Reyna-González ÁM, De-León-Valladares R, Cuéllar-Rodríguez G (2025) Condiciones cálidas y secas como detonantes de brotes de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins en Aramberri, N.L. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. V: e4306. DOI: 10.19136/era.a12nV.4306.

INTRODUCCIÓN

Los insectos descortezadores forman parte de la dinámica de los bosques de coníferas y contribuyen a la sucesión vegetal y reciclaje de nutrientes (Vázquez-Ochoa *et al.* 2023). Estos escarabajos están presentes de forma natural en los bosques. En condiciones endémicas su actividad suele limitarse a árboles individuales o pequeños grupos (Pérez-Miranda *et al.* 2021). Sin embargo, esta condición de equilibrio puede cambiar ante episodios de estrés climático, aumentando sus poblaciones y pueden generar brotes con mortalidad excesiva, comportándose como plagas (Raffa *et al.* 2008, Martínez-Rincón *et al.* 2022).

El clima tiene un efecto considerable en el ciclo biológico de los insectos descortezadores (Cuéllar-Rodríguez *et al.* 2013). Además de la variabilidad interna del sistema climático, desde mediados del siglo XX el calentamiento observado es inequívocamente de origen antropogénico y ha contribuido a cambios en los patrones de precipitación y aumento de la frecuencia e intensidad de extremos de temperatura y precipitación en muchas regiones (IPCC 2021). En este contexto, se ha demostrado una correlación significativa entre anomalías interanuales de la temperatura máxima y la precipitación con incrementos en la abundancia (densidad poblacional) y en la incidencia y magnitud de brotes de insectos descortezadores a escala global (Bentz *et al.* 2010, Sherriff *et al.* 2011, Hart *et al.* 2014) y en México (Cervantes-Martínez *et al.* 2019, Sáenz-Romero *et al.* 2023). La abundancia de insectos descortezadores y la incidencia de brotes aumentan bajo temperaturas cálidas, sequías e incendios forestales (Raffa *et al.* 2008, Soto-Correa *et al.* 2020, Martínez-Rincón *et al.* 2022). Estas condiciones de estrés aumentan la susceptibilidad de los bosques al ataque y suelen coincidir con incrementos de abundancia de insectos descortezadores (Morales-Rangel *et al.* 2016). A nivel histórico, los brotes de insectos descortezadores se han registrado en años con condiciones de sequía y mayor número de incendios forestales (Sosa-Díaz *et al.* 2018, Nardi *et al.* 2022). Además, el calentamiento observado desde principios del siglo XX, con una aceleración a partir de la década de 1970, ha favorecido un incremento en el número de generaciones por año, número de brotes por año, mayor área de distribución y tasas de supervivencia de insectos descortezadores y debilitamiento de los bosques de coníferas (López-Gómez *et al.* 2017, Pureswaran *et al.* 2018, Méndez-Encina *et al.* 2020). Por otro lado, durante períodos lluviosos se ha observado una disminución en el número de brotes por año y de la superficie infestada (Cuéllar-Rodríguez *et al.* 2012, Cuéllar-Rodríguez *et al.* 2013).

Las oscilaciones climáticas de escala interanual y multidecadal como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) se han asociado al ciclo de actividad de los insectos descortezadores (Sherriff *et al.* 2011, Bai *et al.* 2022). Estas oscilaciones, mediante teleconexiones atmosféricas, modulan la temperatura y precipitación regionales; inviernos más cálidos y secos reducen la mortalidad invernal y acortan los tiempos de desarrollo, permitiendo más generaciones por año (Bentz *et al.* 2010). Mientras que la sequía disminuye la defensa resinosa de los pinos y eleva su susceptibilidad (Bernal *et al.* 2023). En conjunto, estas condiciones favorecen incrementos en la frecuencia y magnitud de brotes de descortezadores.

El fenómeno ENOS se refiere a cambios en la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Ecuatorial (Trenberth y Stepaniak 2001). ENOS se presenta cada 2 a 7 años y alcanza su máxima

intensidad en los meses de invierno del hemisferio norte (Zhang *et al.* 2021). En un clima más cálido se proyecta un aumento en la variabilidad de la precipitación asociada a ENOS y en la frecuencia de eventos extremos de El Niño y La Niña, aunque las observaciones no muestran un cambio robusto en su periodicidad promedio (Cai *et al.* 2014, Cai *et al.* 2015, IPCC 2021). La fase cálida o El Niño se refiere a valores de temperatura de la superficie del mar (TSM) superior a 0.5 °C del promedio histórico en la región, mientras que La Niña se presenta cuando hay valores de TSM inferiores a -0.5 °C. La PDO se refiere a variaciones en las anomalías de TSM en la región del Pacífico Norte (Mantua *et al.* 1997, Mantua *et al.* 2002). A diferencia del ENOS, las fases de PDO persisten por períodos de 20 a 30 años y tienen una mayor influencia en la variabilidad climática en América del Norte (Henley *et al.* 2017, Maher *et al.* 2022). La AMO es un modo principal de variabilidad climática que se caracteriza por períodos de calentamiento y enfriamiento en el Atlántico Norte (Martínez-Montero *et al.* 2022).

Se ha demostrado una correlación significativa entre estas oscilaciones y la variabilidad climática observada en diferentes regiones del país (Cavazos 1999, Pavia *et al.* 2006, Méndez-González *et al.* 2009, Fuentes-Franco *et al.* 2014). En invierno, cuando se presenta El Niño y la fase positiva de PDO (PDO^+) se favorecen condiciones frías y húmedas en el norte del país (Magaña *et al.* 2003, Bravo-Cabrera *et al.* 2017). Los patrones son opuestos durante La Niña y la fase negativa de PDO (PDO^- (Méndez-González *et al.* 2009)). Por otro lado, los años con PDO^- y AMO $^+$ se asocian con una mayor frecuencia de sequías en el sur de Estados Unidos y norte de México (McCabe *et al.* 2004, Mijares-Fajardo *et al.* 2024). Además, la precipitación disminuye en casi todo México durante inviernos de La Niña (Fuentes-Franco *et al.* 2014). Las fases de estos fenómenos asociadas a condiciones cálidas y secas pueden estar asociadas con un menor desarrollo de los árboles, mayor número de incendios forestales y una mayor actividad de insectos descortezadores (Bai *et al.* 2022).

En México se encuentran 14 de las 21 especies de insectos descortezadores distribuidas en el norte y centro de América (Armendáriz-Toledoño y Zúñiga 2017). *Dendroctonus mexicanus* Hopkins tiene presencia en los bosques templados de 25 estados y puede tener de dos a cinco generaciones cada año por lo que es el insecto descortezador de mayor distribución en todo el país (Soto-Correa *et al.* 2020, Pérez-Miranda *et al.* 2021). Estas características la convierten en una de las especies de mayor agresividad, pudiendo colonizar hasta 21 especies del género *Pinus* (Soto-Correa *et al.* 2022). *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) es considerado el insecto primario en las poblaciones de *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., y se le considera el insecto descortezador más destructivo en los bosques de Nuevo León (Sánchez-Salas y Torres-Espinosa 2007). Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la asociación de *Dendroctonus mexicanus* con las fases cálidas y frías de las oscilaciones climáticas ENOS, PDO y AMO, así como cuantificar la relación entre la superficie infestada por *D. mexicanus* y las variables climáticas temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en bosques de *Pinus cembroides* del municipio de Aramberri, Nuevo León, durante el periodo 2015–2020. Se planteó como hipótesis que la superficie infestada aumenta durante las fases de oscilaciones climáticas asociadas a sequía y temperaturas elevadas (La Niña, PDO- y AMO $^+$)

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende una superficie de 2 839.5 km² de bosques de *P. cembroides* en el municipio de Aramberri, localizado en el sur del estado de Nuevo León. En esta región se presenta un clima templado sub-húmedo con lluvias en verano y con suelos de tipo Litosol y Regosol de textura media (INEGI 1982). La vegetación corresponde a bosque templado con un estrato que alcanza 20 m de altura (Cuéllar-Rodríguez *et al.* 2013). Las especies dominantes son: *Pinus cembroides* Zucc., *Quercus* spp., y *Pinus pseudostrobus* Lindl (Rzedowski 1978).

Registros de brotes de *D. mexicanus*

Para el análisis de las áreas infestadas se compilaron los reportes de las notificaciones emitidas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) durante el periodo de 2015 a 2020 para el municipio de Aramberri, Nuevo León, México, posteriormente se filtraron los registros verificando que las áreas correspondieran a bosques de *Pinus cembroides*. Estas notificaciones incluyen: bitácora de notificación, agente causal, especie, superficie afectada (ha), y coordenadas (latitud y longitud). Las coordenadas de las infestaciones de *D. mexicanus* en *P. cembroides* se han verificado anualmente en campo desde 2009 por el equipo de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL. El protocolo de verificación incluye la inspección directa de áboles infestados y de evidencias típicas de ataque (resinosis, aserrín rojizo, galerías activas y decoloración del follaje), así como la confirmación taxonómica de *D. mexicanus*. Cada sitio se georreferencia y se registra la presencia de brotes activos o residuales. Posteriormente, las coordenadas y observaciones de campo se integran en una base de datos geoespacial que se actualiza cada año y sirve para delimitar brotes, estimar superficies afectadas y monitorear la evolución temporal de las infestaciones. Para ampliar la base de datos se identificaron las áreas afectadas por *D. mexicanus* mediante interpretación y clasificación de imágenes Sentinel-2 (10 m) correspondientes a 2015-2020.

Para realizar el análisis mediante imágenes satelitales, se emplearon datos de Sentinel-2 que se compone de dos satélites completamente idénticos y en la misma órbita brindando imágenes con una resolución espacial de 10 metros, dichas imágenes se obtuvieron de la plataforma COPERNICUS. Para la descarga, se aplicó un filtro de nubosidad inferior al 5% con la finalidad de tener la mejor calidad posible de datos, se realizó un juego de bandas con los canales RGB y se unieron las imágenes con el programa Qgis en su versión 3.34.3.

En total se obtuvieron ocho mosaicos por año compuestos de imágenes de diferentes días dentro del período analizado. Posteriormente se realizó un entrenamiento con el propósito de realizar una clasificación semiautomática de las áreas infestadas mediante el algoritmo Semi Automatic Classification Plugin. Con esto, se logró identificar rodales infestados los cuales se verificaron en las imágenes, posteriormente, de forma manual, se corrigieron y se identificaron las áreas afectadas en el polígono para obtener la superficie infestada. La clasificación fue no supervisada. Los datos de superficie infestada se añadieron a la base de datos con los registros de presencia y ausencia ya que algunos brotes debido a su inaccesibilidad no fueron detectados o reportados a la CONAFOR.

Información climática

La información meteorológica (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) se obtuvo de series mensuales de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional. Se seleccionaron las estaciones actualmente operativas en Aramberri, N.L., con al menos 30 años de registros y con un porcentaje de datos faltantes menor a 10% por año de las variables seleccionadas (Tabla 1). Se analizaron y homogeneizaron las series de tiempo para identificar valores erróneos (por ejemplo; precipitaciones negativas). Se estimaron anomalías respecto a la climatología de referencia (1991-2020). Adicionalmente se utilizó una malla interpolada a una resolución espacial de 0.25° con información derivada de estaciones del SMN de 1950 a 2020 para analizar la distribución espacial de las variables climáticas seleccionadas

Tabla 1. Estaciones meteorológicas localizadas en el municipio de Aramberri.

ID	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Período
19005	Aramberri II	24.103	-99.818	1080	1970-2020
19111	La Ascensión	24.322	-99.910	1980	1997-2020
19093	San Juanito de Reséndiz	24.267	-99.858	2000	1975-2020

El Índice Oscilación del Sur (SOI) se utilizó para clasificar los eventos cálidos (SOI+ El Niño) y fríos (SOI-, La Niña) del ENOS en el Pacífico Ecuatorial. Los datos de PDO y AMO están disponibles en el sitio de The NOAA Physical Sciences Laboratory.

Análisis estadístico

Se calcularon estadísticas descriptivas mensuales de Tmax, Tmin, precipitación y superficie infestada por *D. mexicanus* en bosques de *P. cembroides*. La relación entre las variables climáticas locales y los índices de variabilidad climática se evaluó mediante correlaciones de Pearson entre las series mensuales de Tmax, Tmin, precipitación y los índices SOI, PDO y AMO, considerando desfases de 0 a 11 meses. Se identificaron correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Adicionalmente, se construyeron compuestos de anomalías de precipitación y temperatura máxima según las fases positivas y negativas de SOI, PDO y AMO para los meses de invierno y verano. Para cada fase, las anomalías se calcularon respecto al promedio 1991-2020 y su significancia estadística se evaluó mediante pruebas *t de Student* de dos colas ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS

Se compararon las condiciones climáticas de 1991-2020. El periodo 2015-2020 presentó temperaturas máximas (25.6 °C), medias (15.3 °C) y mínimas (8.3 °C) inferiores a los valores históricos (29.6 °C, 21 °C y 12.5 °C, respectivamente), mientras que la precipitación anual (555.3 mm) fue mayor que el histórico (506 mm). Los trimestres más cálidos fueron abril -junio (32.3 °C) y julio-septiembre (31.5 °C), y el trimestre más húmedo fue julio -septiembre (80.1 mm). El trimestre más seco correspondió a noviembre - enero (11.6 mm). El año más cálido fue 2017 (Tmax 25.1 °C), mientras que 2015 fue el año menos cálido (21.8 °C).

Se identificaron 39 brotes de *Dendroctonus mexicanus*, provenientes de dos fuentes: 17 registros oficiales de CONAFOR y 22 detectados mediante análisis de imágenes Sentinel-2 (Figura 1).

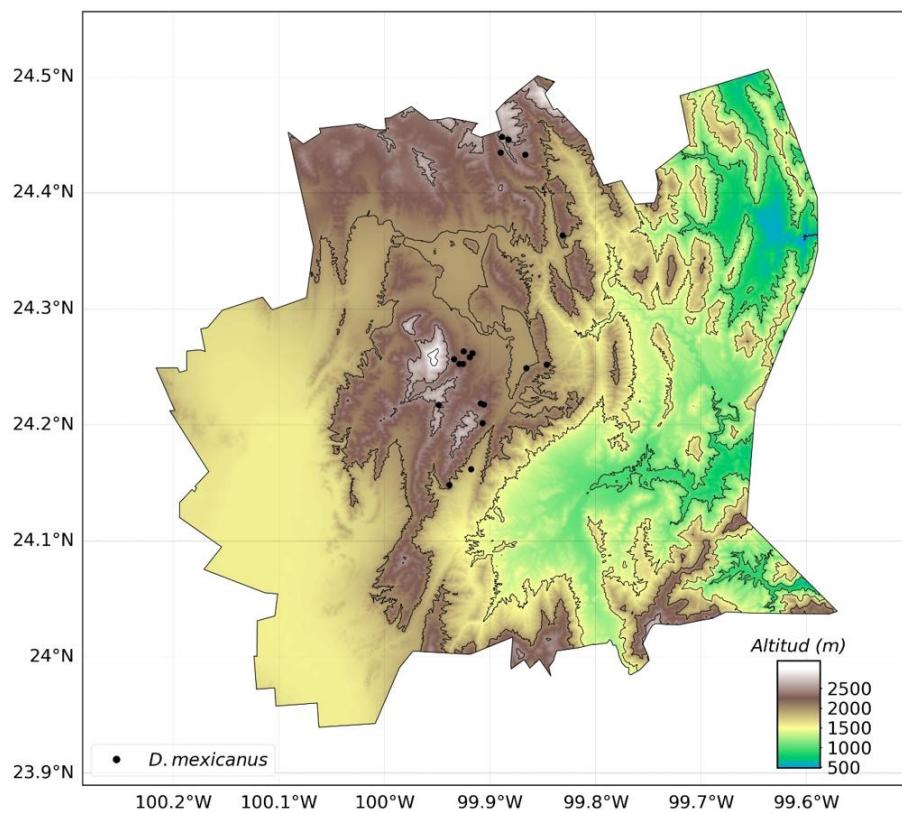


Figura 1. Localización de los brotes identificados de *D. mexicanus* en bosques de *P. cembroides* en el municipio de Aramberri.

La Figura 2 muestra la superficie infestada por *D. mexicanus* por año y por temporada en Aramberri, N.L. La superficie total infestada fue de 2 058.4 ha, equivalente al 17.7% de los bosques de *Pinus cembroides* en el municipio de Aramberri, N.L. El año más afectado fue 2017, con 51.2% del total, mientras que en 2020 se observó una reducción del 82% respecto a 2017. En todos los años analizados, la mayor superficie afectada se concentró en primavera (abril–junio) y verano (julio–septiembre), coincidiendo con incrementos en la temperatura máxima. Durante ambos períodos se registraron temperaturas máximas promedio superiores a 30 °C, temperaturas medias mensuales entre 22 y 25 °C y temperaturas mínimas por encima de 13 °C. La afectación disminuyó en otoño e inicios de invierno conforme las temperaturas descendieron, con la excepción de 2016, cuando se registró mayor superficie infestada en otoño y no en primavera.

En general, la superficie infestada aumentó con temperaturas máximas superiores a 25 °C y disminuyó por debajo de 23 °C, alcanzando sus valores más altos con temperaturas mayores a 29 °C (Figura 3).

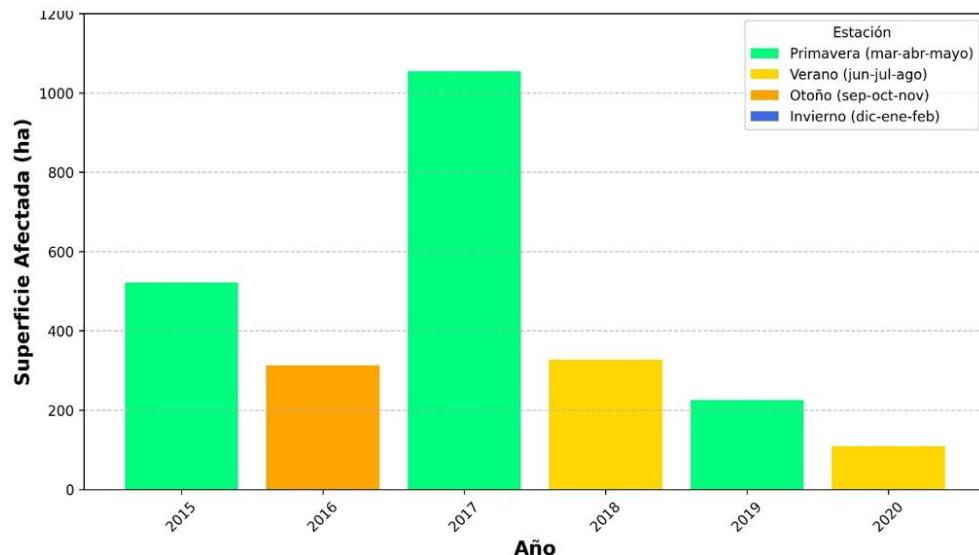


Figura 2. Superficie (ha) de bosques de *Pinus cembroides* Zucc. afectada por *Dendroctonus mexicanus* en el municipio de Aramberri, N.L., en el período 2015-2020.

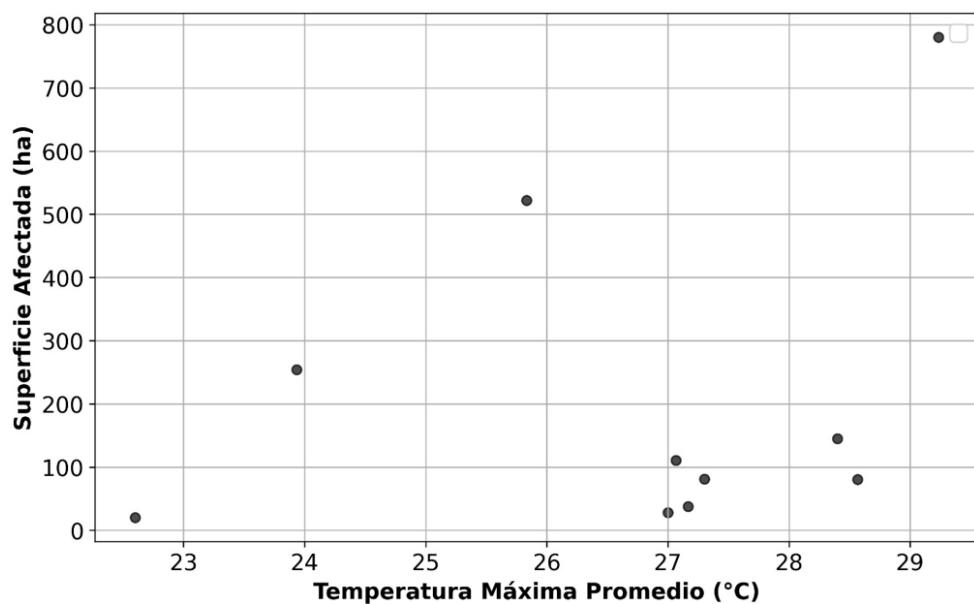


Figura 3. Relación entre la temperatura máxima promedio estacional (°C) y la superficie afectada (ha) por *D. mexicanus* en Aramberri, 2015–2020.

La evaluación estacional mostró variabilidad marcada entre años. Las condiciones de La Niña dominaron durante los inviernos de 2016, 2017 y 2020, mientras que El Niño se presentó en 2015 y 2018. PDO- y AMO+ influyeron con mayor fuerza en invierno y primavera. Las mayores anomalías cálidas y secas se asociaron a La Niña en invierno y a PDO+ en verano (Tabla 2).

Tabla 2. Fases de PDO, SOI y AMO durante los meses de invierno (diciembre-enero-febrero), primavera (marzo-abril-mayo), verano (junio-julio-agosto) y otoño (septiembre-octubre-noviembre) de 2015 a 2020.

Año	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
2015	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-
2016	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI+
2017	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI+
2018	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI+	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-
2019	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-	PDO+ AMO+ SOI-
2020	PDO- AMO+ SOI-	PDO- AMO+ SOI+	PDO- AMO+ SOI+	PDO- AMO+ SOI+

La mayor superficie afectada en 2017 se asoció a condiciones de invierno 2016-2017 de La Niña y PDO+. En contraste, los años de menor superficie se presentaron durante una transición de condiciones neutrales a La Niña y PDO-. Los mapas de compuestos de anomalías de temperatura y precipitación (Figura 4), mostraron que La Niña generó condiciones cálidas y secas en invierno y condiciones húmedas en verano ($p < 0.05$). El Niño presentó patrones inversos y significativos en verano ($p < 0.05$). Las fases PDO- y AMO+ se vincularon con una intensificación de las anomalías cálidas y secas, especialmente durante enero y junio ($p < 0.05$) (Figura 5). En general, se observó una mayor influencia de las oscilaciones PDO y AMO durante el invierno y primavera que durante los meses de verano.

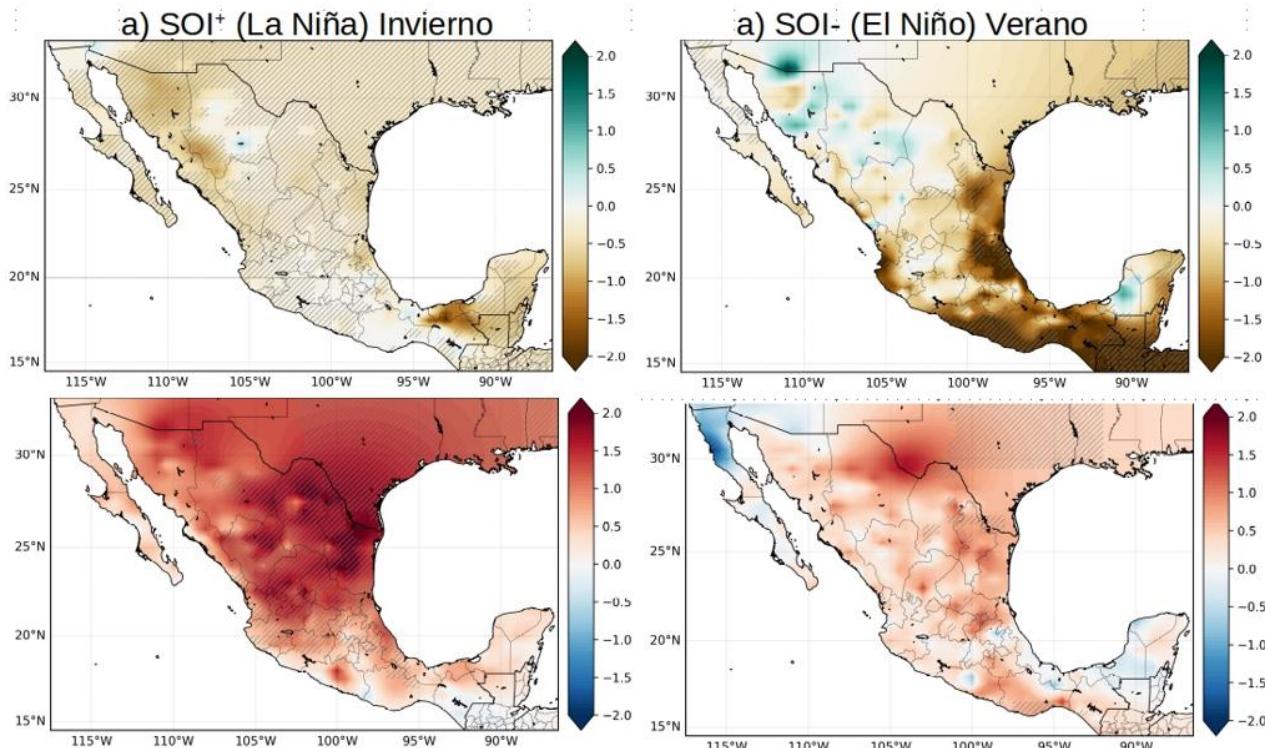


Figura 4. Anomalías de precipitación (arriba) y temperatura máxima (abajo) durante (SOI+, La Niña) en invierno y (SOI-, El Niño) en verano. La región con grilla indica anomalías significativas ($p < 0.05$).

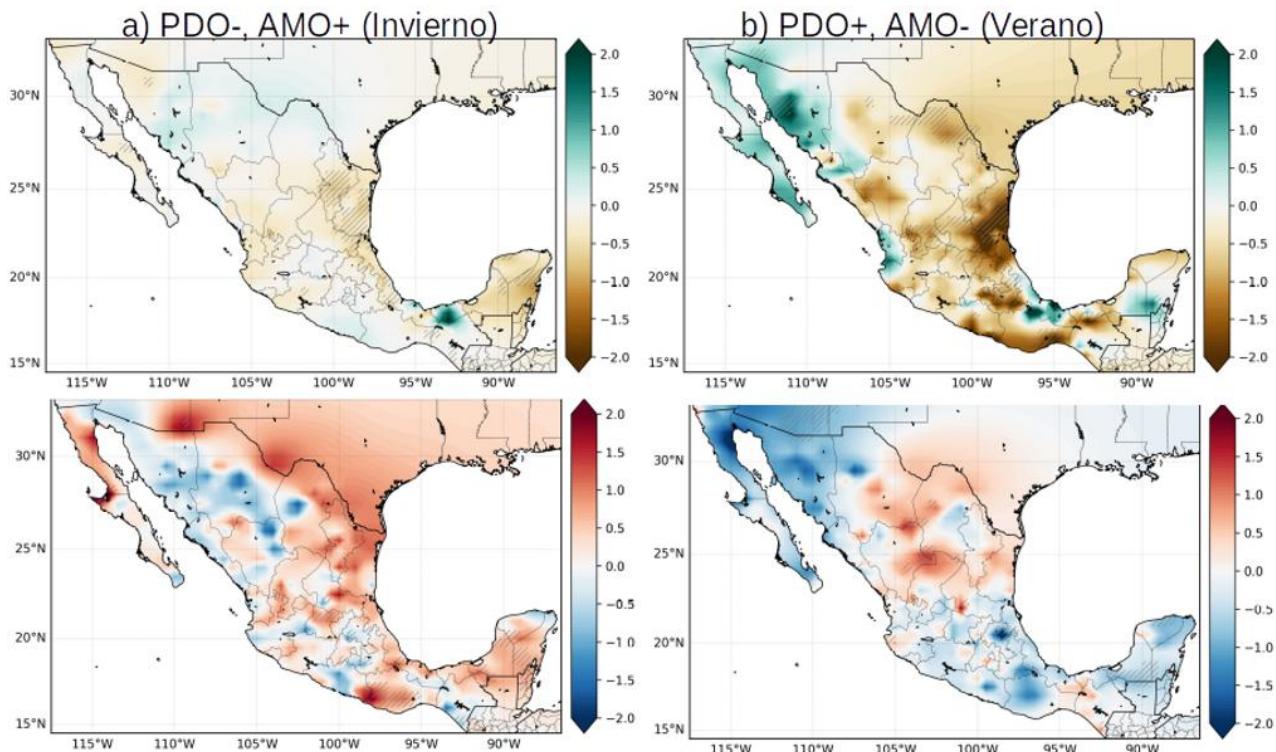


Figura 5. Anomalías de precipitación (arriba) y temperatura máxima (abajo) en a) PDO⁻ y AMO⁺ y b) PDO⁺ y AMO⁻ (invierno y verano). La región con grilla indica anomalías significativas ($p < 0.05$).

Las correlaciones entre precipitación y temperatura mínima con las oscilaciones ENOS, PDO, AMO fueron débiles o no significativas (Tablas 3 y 4). Se obtuvo una correlación negativa y significativa ($p < 0.05$) entre PDO y temperatura máxima hasta siete meses posteriores (Tabla 5), indicando que PDO⁻ favorece condiciones más cálidas. SOI se correlacionó positivamente con Tmax, lo que indica que La Niña favorece temperaturas más altas.

Tabla 3. Correlación entre precipitación en el municipio de Aramberri y PDO, AMO y SOI.

Desfase (meses)	PDO	AMO	SOI
0	-0.044 ($p = 0.405$)	0.020 ($p = 0.705$)	-0.025 ($p = 0.637$)
1	-0.011 ($p = 0.836$)	0.004 ($p = 0.940$)	-0.065 ($p = 0.219$)
2	-0.046 ($p = 0.386$)	-0.018 ($p = 0.734$)	-0.021 ($p = 0.692$)
3	-0.059 ($p = 0.266$)	-0.027 ($p = 0.611$)	-0.059 ($p = 0.266$)
4	-0.066 ($p = 0.241$)	-0.051 ($p = 0.338$)	-0.035 ($p = 0.511$)
5	-0.076 ($p = 0.153$)	-0.056 ($p = 0.293$)	0.052 ($p = 0.329$)
6	-0.054 ($p = 0.311$)	-0.031 ($p = 0.561$)	0.015 ($p = 0.779$)
7	-0.063 ($p = 0.238$)	-0.018 ($p = 0.736$)	0.134* ($p = 0.012$)
8	-0.066 ($p = 0.217$)	-0.010 ($p = 0.852$)	0.094 ($p = 0.078$)
9	-0.028 ($p = 0.601$)	0.012 ($p = 0.823$)	0.037 ($p = 0.490$)
10	-0.076 ($p = 0.156$)	0.029 ($p = 0.589$)	0.080 ($p = 0.135$)
11	-0.120* ($p = 0.025$)	0.045 ($p = 0.402$)	0.032 ($p = 0.552$)

*Correlaciones significativas ($p < 0.05$).

Tabla 4. Correlación entre temperatura mínima en el municipio de Aramberri y PDO, AMO y SOI.

Desfase (meses)	PDO	AMO	SOI
0	-0.103 (p = 0.051)	0.030 (p = 0.571)	0.103 (p = 0.051)
1	-0.105* (p = 0.047)	0.040 (p = 0.450)	0.063 (p = 0.234)
2	-0.097 (p = 0.067)	0.044 (p = 0.407)	0.056 (p = 0.291)
3	-0.104* (p = 0.050)	0.059 (p = 0.266)	0.036 (p = 0.498)
4	-0.094 (p = 0.077)	0.062 (p = 0.243)	0.032 (p = 0.548)
5	-0.079 (p = 0.0137)	0.057 (p = 0.284)	0.051 (p = 0.338)
6	-0.073 (p = 0.171)	0.054 (p = 0.311)	0.079 (p = 0.138)
7	-0.072 (p = 0.177)	0.065 (p = 0.223)	0.093 (p = 0.081)
8	-0.058 (p = 0.278)	0.068 (p = 0.203)	0.091 (p = 0.088)
9	-0.049 (p = 0.360)	0.061 (p = 0.255)	0.081 (p = 0.130)
10	-0.033 (p = 0.539)	0.062 (p = 0.248)	0.064 (p = 0.233)
11	-0.024 (p = 0.655)	0.064 (p = 0.233)	0.052 (p = 0.333)

*Correlaciones significativas (p < 0.05).

Tabla 5. Correlación entre temperatura máxima en el municipio de Aramberri y PDO, AMO y SOI.

Desfase (meses)	PDO	AMO	SOI
0	-0.282* (p = 0.001)	0.027 (p = 0.610)	0.262* (p = 0.001)
1	-0.265* (p = 0.001)	0.031 (p = 0.558)	0.253* (p = 0.001)
2	-0.278* (p = 0.001)	0.054 (p = 0.308)	0.220* (p = 0.001)
3	-0.291* (p = 0.001)	0.077 (p = 0.147)	0.214* (p = 0.001)
4	-0.263* (p = 0.001)	0.073 (p = 0.169)	0.207* (p = 0.001)
5	-0.246* (p = 0.001)	0.059 (p = 0.268)	0.171* (p = 0.001)
6	-0.204* (p = 0.001)	0.077 (p = 0.148)	0.174* (p = 0.001)
7	-0.135* (p = 0.011)	0.079 (p = 0.139)	0.144* (p = 0.007)
8	-0.100 (p = 0.061)	0.052 (p = 0.331)	0.109* (p = 0.041)
9	-0.088 (p = 0.100)	0.038 (p = 0.478)	0.041 (p = 0.444)
10	-0.070 (p = 0.192)	0.066 (p = 0.218)	0.068 (p = 0.205)
11	-0.077 (p = 0.151)	0.088 (p = 0.101)	0.087 (p = 0.105)

DISCUSIÓN

En total se obtuvieron 39 registros de *D. mexicanus* en Aramberri entre 2015 y 2020, con una superficie infestada acumulada de 2 058.4 ha. Esta superficie supera la reportada previamente para el periodo 2008-2012 (1 428.95 ha), aun cuando 2011 fue uno de los años más secos a nivel nacional debido a una de las fases de La Niña de mayor intensidad reciente (Seager *et al.* 2014). Este incremento sugiere que, además de la variabilidad interanual de temperatura y precipitación, existen condiciones locales de vulnerabilidad en los bosques de *Pinus cembroides* que han favorecido una mayor incidencia de brotes en la última década.

El aumento de la temperatura máxima se asoció con una mayor superficie infestada por *D. mexicanus* en el área de estudio. Las mayores superficies afectadas ocurrieron cuando la

temperatura máxima se ubicó en los rangos de 24–26 °C y mayor de 29 °C, temperaturas superiores a los umbrales propuestos por Sáenz-Romero *et al.* (2023) para la presencia de *D. mexicanus* en otras regiones de México. Esta diferencia podría deberse al contexto de mayor aridez en que se localizan los bosques de *P. cembroides* de Aramberri, situados hacia el límite con el Altiplano Mexicano. En estos ambientes, pequeñas anomalías positivas de temperatura pueden traducirse en mayor déficit hídrico, reducción en la producción de resina y debilitamiento de las defensas del arbolado (Raffa *et al.* 2008), de modo que los brotes se asocian a temperaturas máximas relativamente más elevadas (Gómez-Pineda *et al.* 2022). La estructura de los rodales, como densidad, área basal, proporción de árboles suprimidos (Martínez-Rincón *et al.* 2022) y las prácticas de manejo también pueden amplificar este efecto: rodales densos, con fuerte competencia por agua y sin aclareos o saneamientos oportunos, concentran árboles estresados que funcionan como focos de infestación y favorecen la propagación del insecto.

Aunque diversos estudios han identificado los meses de invierno como el periodo de mayor actividad de *D. mexicanus* (Cuéllar-Rodríguez 2013, Soto-Correa *et al.* 2022), en este trabajo la mayor superficie infestada se registró cuando se incrementó la temperatura máxima a inicios de primavera y verano, disminuyendo durante otoño e inicios de invierno. Este patrón sugiere un mecanismo de dos etapas: a) inviernos relativamente secos y cálidos debilitan fisiológicamente a los árboles, y b) la primavera-verano proporciona condiciones térmicas óptimas para el crecimiento poblacional del insecto y la expansión de los brotes. Estos resultados coinciden con lo reportado para *D. mexicanus* en bosques de pino del estado de Hidalgo (Soto-Correa *et al.* 2022), lo que indica que la combinación de inviernos secos y veranos cálidos constituye un detonante recurrente de brotes en distintas regiones de coníferas del centro-norte de México.

La cronología de los brotes en Aramberri estuvo estrechamente relacionada con las fases específicas de ENOS, moduladas adicionalmente por PDO y AMO. La superficie infestada observada entre 2015 y 2020 estuvo precedida por un evento El Niño fuerte (2014-2016) y por la ocurrencia de La Niña 2016-2017. La mayor superficie infestada registrada en 2017 estuvo asociada con La Niña invernal 2016-2017, mientras que los años con menor superficie se presentaron bajo condiciones Neutrales. Históricamente, los eventos La Niña invernales favorecen condiciones secas y cálidas en el centro y norte de México debido al desplazamiento más al norte de la corriente en chorro y a un menor número de sistemas frontales (Magaña *et al.* 2003, Bravo-Cabrera *et al.* 2019). En contraste, los inviernos con El Niño tienden a ser más húmedos y fríos por una configuración de la corriente en chorro que favorece el ingreso de frentes fríos (Pavia *et al.* 2006, Bravo-Cabrera *et al.* 2017). Los compuestos de anomalías confirman que estos patrones de gran escala se traducen, en el noreste de México, en inviernos más secos y cálidos bajo La Niña, es decir, en condiciones de mayor aridez que anteceden el año de máxima superficie infestada.

Durante el verano, estos patrones suelen invertirse (Magaña *et al.* 2003), debido a que El Niño favorece sequías e incendios en el centro-sur del país, mientras que en el norte la respuesta puede ser débil o estar condicionada por PDO (Pavia *et al.* 2006, Cervantes-Martínez *et al.* 2019). En este estudio, se observó que las fases PDO- y AMO+ se asociaron con anomalías cálidas y secas significativas en invierno en el noreste de México, mientras que las combinaciones PDO+ y AMO+ o PDO+ y AMO- favorecieron condiciones secas y cálidas en verano. De acuerdo con Ponce-Calderón *et al.* (2023), las fases de ENOS asociadas a sequías debilitan los bosques de *Pinus*;

nuestros resultados sugieren que, en Aramberri, esta señal se refuerza cuando coinciden La Niña, PDO desfavorable y la aridez propia del límite con el Altiplano, generando un contexto particularmente propicio para el aumento poblacional de *D. mexicanus* y el debilitamiento de *P. cembroides*.

Las correlaciones entre las variables climáticas locales y los índices SOI y PDO fueron significativas, pero de baja magnitud ($|r| < 0.30$), lo que indica asociaciones débiles. Esto concuerda con la hipótesis de que ENOS y PDO actúan como moduladores, influyendo principalmente sobre la temperatura y, en menor medida, sobre la precipitación, pero sin determinar por sí solos la ocurrencia de brotes. La presencia de brotes extensos parece requerir la coincidencia de varios factores: i) condiciones locales de aridez y estructura de rodales que incrementan la vulnerabilidad del arbolado; ii) manejo forestal insuficiente para reducir el volumen de árboles estresados (falta de aclareos o saneamientos tardíos); y iii) fases de ENOS/PDO/AMO que favorecen inviernos secos y cálidos.

Los resultados son consistentes con estudios previos que identificaron una correlación significativa entre brotes de plagas y las fases de ENOS asociadas a sequía en México (Cervantes-Martínez *et al.* 2019). En coníferas de 15 estados, estos autores documentaron que los brotes, principalmente de *D. mexicanus*, *D. frontalis* y *D. adjunctus*, se presentaron en años secos y estuvieron precedidos por sequía intensa el año anterior (NIÑO-3 y PDSI negativos significativos en -1), lo cual indica una clara asociación con sequías moduladas por ENOS. El presente estudio aporta evidencia de que, en un contexto semiárido de *P. cembroides*, esta señal climática de gran escala parece interactuar con la aridez local, la estructura de los rodales y el manejo forestal, modulando la magnitud y recurrencia de los brotes de *D. mexicanus* en el noreste de México.

CONCLUSIONES

Entre 2015 y 2020 se registraron 39 brotes de *Dendroctonus mexicanus* en bosques de *Pinus cembroides* de Aramberri, Nuevo León, con una superficie infestada acumulada de 2 058.4 ha (17.7% del bosque de *P. cembroides* del municipio), lo que evidencia un incremento con respecto a períodos previos y señala mayor incidencia reciente de brotes. La superficie afectada mostró asociación positiva con la temperatura máxima, alcanzando valores máximos cuando la Tmax estacional se ubicó entre 24-26 °C y por encima de 29 °C, particularmente en primavera y verano. Mientras que la afectación disminuyó por debajo de 23 °C y durante otoño-invierno. Esta sensibilidad térmica sugiere que la aridez característica del límite con el Altiplano Mexicano, y la presencia de rodales densos y ausencia de tratamientos silvícolas oportunos, incrementan la vulnerabilidad del arbolado y favorecen la propagación de infestaciones. La cronología de los brotes se relacionó con fases cálidas y secas de ENOS, moduladas por PDO y AMO, destacando la influencia de La Niña en el año de mayor afectación. Aunque las correlaciones entre variables climáticas locales y los índices SOI, PDO y AMO fueron significativas, los compuestos de anomalías mostraron que estas oscilaciones actúan como moduladores del clima regional, generando inviernos más secos y cálidos que anteceden los períodos de mayor incidencia de brotes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca al primer autor.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Armendáriz-Toledano F, Zúñiga G (2017) Illustrated key to species of genus *Dendroctonus* (Curculionidae: Scolytinae) occurring in Mexico and Central America. Journal of Insect Science 17: 1-15. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ies009>
- Bai M, Wang X, Yao Q, Fang K (2022) ENSO modulates interaction between forest insect and fire disturbances in China. Natural Hazards Research 2: 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.04.001>
- Bentz BJ, Régnière J, Fettig CJ, Hansen EM, Hayes JL, Hicke JA, Kelsey RG, Negrón JF, Seybold SJ (2010) Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada: Direct and indirect effects. BioScience 60: 602-613. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6>
- Bernal AA, Kane JM, Knapp EE, Zald HSJ (2023) Tree resistance to drought and bark beetle-associated mortality following thinning and prescribed fire treatments. Forest Ecology and Management 530: 120758. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120758>
- Bravo-Cabrera JL, Azpra-Romero E, Zalarruqui-Such V, Gay-García C (2017) Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: An extended treatment. Atmósfera 30: 221-232. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.02>
- Cavazos T (1999) Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas. Journal of Climate 12: 1506-1523.
- Cervantes-Martínez R, Cerano-Paredes J, Sánchez-Martínez G, Villanueva-Díaz J, Esquivel-Arriaga G, Cambrón-Sandoval VH, Méndez-González J, Castruita-Esparza LU (2019) Historical bark beetle outbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1895–2015) and their relationship with droughts. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 25: 269-290. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.006>
- Cuéllar-Rodríguez G, Equihua-Martínez A, Villa-Castillo J, Estrada-Venegas EG, Méndez-Montiel T, Romero-Nápoles J (2013) Análisis espacio-temporal de bosques de *Pinus cembroides* atacados por *Dendroctonus mexicanus*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4: 42-49. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.430>
- Cuéllar-Rodríguez G, Equihua-Martínez A, Estrada-Venegas E, Méndez-Montiel T, Villa-Castro J, Romero-Nápoles J (2012) Fluctuación poblacional de *Dendroctonus mexicanus* y su correlación con variables climáticas. Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle 13: 12-19. <https://doi.org/10.17151/bmeuv.2012.13.2.2>
- Fuentes-Franco R, Giorgi F, Coppola E, Kucharski F (2015) The role of ENSO and PDO in variability of winter precipitation over North America. Climate Dynamics 46: 3259-3277. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2767-y>

- Gómez-Pineda E, Hammond WM, Trejo-Ramírez O, Gil-Fernández M, Allen CD, Blanco-García A, Sáenz-Romero C (2022) Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests. *Forest Ecology and Management* 505: 119944. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>
- Hanley DE, Bourassa MA, O'Brien JJ, Smith SR, Spade ER (2003) A quantitative evaluation of ENSO indices. *Journal of Climate* 16: 1249-1258. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)161249](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)161249)
- Hart SJ, Veblen TT, Eisenhart KS, Jarvis J, Kulakowski D (2014) Drought induces spruce beetle outbreaks across Colorado. *Ecology* 95: 930-939. <https://doi.org/10.1890/13-1810.1>
- IPCC (2021). Cambio climático 2021: Bases físicas. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Cambridge University Press.
- López-Gómez V (2017) Los escarabajos descorzadores: responsables de la pérdida de masa forestal en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 8: 7-21. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i39.97>
- Magaña VO, Vázquez JL, Pérez JL, Pérez JB (2003) Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 313-330. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.3.394>
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace J, Francis R (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069-1079.
- Mantua NJ, Hare SR (2002) The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography* 58: 35-44. <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>
- Martínez-Rincón S, Valdez-Lazalde JR, De los Santos-Posadas HM, Sánchez-Martínez G (2022) Risk of infestations by *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis* in forests of Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 28: 37-55. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.11.069>
- Martínez-Sifuentes AR, Villanueva-Díaz J, Estrada-Ávalos J (2020) Runoff reconstruction with tree rings in Sonora, Mexico. *iForest* 13: 98-106. <https://doi.org/10.3832/ifor3190-013>
- McCabe CJ, Palecki MA, Betancourt JL (2004) Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the U.S. *PNAS* 101: 4136-4141. <https://doi.org/10.1073/pnas.0306738101>
- Méndez-Encina FM, Méndez-González J, Cerano-Paredes J (2020) Actual and potential distribution of *Dendroctonus mexicanus* under climate change scenarios. *Madera y Bosques* 26: e2622002. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622002>
- Méndez-González J, Ramírez-Leyva A, Cornejo-Oviedo E, Zárate-Lupercio A, Cavazos T (2010) Teleconexiones de la PDO a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas* 73: 57-70.
- Mijares-Fajardo R, Lobato-Sánchez R, Patiño-Gómez C, Guevara-Polo DE (2024) Atlantic and Pacific SST correlations with precipitation over northern Mexico. *Atmósfera* 38: 214-234. <https://doi.org/10.20937/ATM.53257>
- Morales-Rangel A, Cambrón-Sandoval VH, Soto-Correa JC, Wallace-Jones R, Obregón-Zúñiga JA (2018) Temperature effect on *Dendroctonus* species under climate change. *Acta Zoológica Mexicana* 34: 1-18. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412141>
- Nardi L, Camarero JJ, Battipaglia G, de Luis M (2022) Increasing wildfire occurrence and insect outbreaks linked to climate warming in pine forests. *Forest Ecology and Management* 505: 119930. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119930>
- Pavia EG, Graef F, Reyes J (2006) PDO-ENSO effects on the climate of Mexico. *Journal of Climate* 19: 6433-6438. <https://doi.org/10.1175/JCLI4045.1>
- Pérez-Miranda R, González-Hernández A, Velasco-Bautista E, Romero-Sánchez ME, Arriola-Padilla VJ, Acosta-Mireles M, Carrillo-Anzures F (2021) Temporal analysis of the distribution of *D. mexicanus* in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12: 27-55. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.1079>
- Ponce-Calderón LP, Villanueva-Díaz J, Rodríguez-Trejo DA, Bilbao BA, Álvarez-Gordillo GDC (2023) Climate response of *Pinus oocarpa* radial growth. *iForest* 16: 174-181. <https://doi.org/10.3832/ifor4112-016>

- Pureswaran DS, Roques A, Battisti A (2018) Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports* 4: 35-50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>
- Raffa KF, Aukema BH, Bentz BJ, Carroll AL, Hicke JA, Turner MG, Romme WH (2008) Cross-scale drivers of bark beetle eruptions. *BioScience* 58: 501-518. <https://doi.org/10.1641/B580607>
- Rubio-Ugalde DJ, Cambrón-Sandoval VH, Vergara-Pineda S (2017) Coleópteros depredadores asociados al monitoreo de descortezadores. *Entomología Mexicana* 4: 186-191.
- Rzedowski J (1978) Vegetación de México. Limusa. México. 505p.
- Salinas-Moreno Y, Mendoza G, Barrios MA, Cisneros R, Macías-Sámano J, Zúñiga G (2004) Areography of the genus *Dendroctonus* in Mexico. *Journal of Biogeography* 31: 1163-1177.
- Sáenz-Romero C, Cambrón-Sandoval VH, Hammond W, Méndez-González J, Luna-Soria H, Macías-Sámano JE, Gómez-Romero M, Trejo-Ramírez O, Allen CD, Gómez-Pineda E, Del-Val E (2023) Abundance of *D. frontalis* and *D. mexicanus* along altitudinal transects in Mexico. *PLOS One* 18: e0288067. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288067>
- Sánchez-Salas JA, Torres-Espinosa LM (2007) Biología y hábitos del descortezador *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y estrategias de control en Pinus teocote en Nuevo León. CIRNE, INIFAP. Folleto Técnico No. 29. Saltillo, Coahuila, México. 35p.
- Seager R, Ting M, Li C, Naik N, Cook B, Nakamura J, Liu H (2014) North American drought: Reconciling observed changes in hydroclimate with projections. *Journal of Climate* 27: 4581-4603. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00480.1>
- Schlesinger M, Ramankutty N (1994) An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature* 367: 723-726. <https://doi.org/10.1038/367723a0>
- Schoennagel T, Veblen TT, Romme WH, Sibold JS, Cook ER (2005) ENSO and PDO variability affect drought-induced fire occurrence. *Ecological Applications* 15: 2000-2014. <https://doi.org/10.1890/04-1579>
- Sherriff RL, Berg EE, Miller AE (2011) Climate variability and spruce beetle outbreaks in Alaska. *Ecology* 92: 1459-1470. <https://doi.org/10.1890/10-1118.1>
- Sosa-Díaz L, Méndez-González J, García-Aranda MA, Cambrón-Sandoval VH, Villarreal-Quintanilla JA, Ruiz-González CG, Montoya-Jiménez JL (2018) Distribución potencial de plagas en bosques de coníferas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9: 187-208. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.159>
- Soto-Correa JC, Girón-Gutiérrez D, Cambrón-Sandoval VH (2020) Coloración y abundancia de *Dendroctonus mexicanus* en cuatro regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11: 163-184. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.668>
- Soto-Correa JC, Hernández-Muñoz G, Cambrón-Sandoval VH (2022) Effect of climatic variables on *Dendroctonus mexicanus* from Hidalgo forests. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13: 31-55. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.1198>
- Tran JK, Ylioja T, Billings RF, Régnière J, Ayres MP (2007) Impact of minimum winter temperatures on *Dendroctonus frontalis* dynamics. *Ecological Applications* 17: 882-899. <https://doi.org/10.1890/06-0512>
- Trenberth KE, Hoar TJ (1997) El Niño and climate change. *Geophysical Research Letters* 24: 3057-3060. <https://doi.org/10.1029/97GL03092>
- Trenberth KE, Stepaniak DP (2001) Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate* 14: 1697-1701.
- Vázquez-Ochoa MF, Sánchez-Velásquez LR, Hernández-Vargas G, Ibarra-Zavaleta SP, Ruiz-Montiel C, Pineda-López MR (2022) Presencia de *Dendroctonus* en pinos del Parque Nacional Cofre de Perote. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 93: e934048. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2022.93.4048>
- Zhang W, Jiang F, Stuecker MF, Jin FF, Timmermann A (2021) Spurious North Tropical Atlantic precursors to El Niño. *Nature Communications* 12: 3096. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23411-6>