

Análisis de la amplitud del nicho ecológico de *Zadiprion* spp., un defoliador de *Pinus* en el Sureste de México

Amplitude of the ecological niche of a *Pinus* defoliator in Southeast Mexico.
Diprionidae: *Zadiprion* spp.

**Michelle M. Pacheco García^a, Irene Bautista-Juárez^a, Wenceslao Santiago-García^a,
Lizbeth Luna Bautista^a, Faustino Ruiz-Aquino^a, Enrique Ramírez-García^b, Mario E. Suárez-Mota^{a*}**

*Autor de correspondencia: ^aUniversidad de la Sierra Juárez, Oaxaca, México División de Estudios de Postgrado, avenida Universidad s/n, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, CP 68725, tel.: +52 01 951 5536362 Ext. 600, mesuarez@unsij.edu.mx

^bUniversidad Nacional Autónoma de México, Estación de Biología Chamela, Instituto de Biología, Jalisco, México, km 59 Carr. Fed. 200, Barra de Navidad-Pto, Vallarta, Mpio, La Huerta, Jalisco

SUMMARY

Forest use in the Sierra Norte de Oaxaca, Mexico, has been threatened by the damage of a defoliator called the sawfly (*Zadiprion* spp.). The current magnitude of damage by this species is unknown, as are the biological and ecological aspects that determine its distribution. The aim of this work was to estimate the distribution and potential area of impact of *Zadiprion* spp. in the Sierra Norte de Oaxaca and the edaphoclimatic variables that favor its development in the region. Soil samples and specimens of the insect were collected to analyze in the laboratory. Ecological niche models were generated with MaxEnt (ver. 3.3.3), using records of the presence of the species and 19 bioclimatic variables. Reliability was evaluated using the area under the curve and a principal component analysis was carried out to identify variables. The optimal values of edaphological variables were calculated using the Kernel density index and the similarity between sites using the Gower metric. The niche models had values greater than 0.90. The most important edaphological variables impacting presence of the pest were organic matter, texture, density, infiltration, pH and moisture content. The development of adequate strategies to control the sawfly is necessary, as the pest can affect a considerable area of forest destined for forest management in a short amount of time.

Keywords: kernel, *Pinus chiapensis*, Ixtlán, Ixtepeji, Zochina.

RESUMEN

El aprovechamiento forestal en la Sierra Norte de Oaxaca, México, se ha visto amenazado por el daño ocasionado por un insecto defoliador *Zadiprion* spp. El estado actual de afectación que ocasiona es desconocido, así como aspectos biológicos y ecológicos que determinan la distribución de la especie. El objetivo de este trabajo es estimar la distribución y área potencial de afectación de *Zadiprion* spp. en la Sierra Norte de Oaxaca, además de conocer las variables edafoclimáticas que favorecen su desarrollo en la región. Para ello, se colectaron muestras de suelo y ejemplares del insecto para analizar en laboratorio. Se generaron modelos de nicho ecológico con MaxEnt (ver. 3.3.3), registros de la presencia de la especie y 19 variables bioclimáticas, la confiabilidad fue evaluada mediante el área bajo la curva y se realizó un análisis de componentes principales para identificar variables con mayor contribución de predicción. Se calcularon los valores óptimos de variables edafológicas mediante el índice de densidad de Kernel y la similitud entre sitios mediante la métrica de Gower. Los modelos de nicho tuvieron valores superiores a 0,90. Las variables edafológicas con mayor importancia para la plaga fueron, materia orgánica, textura, densidad, infiltración, pH y contenido de humedad. Es necesario crear estrategias adecuadas de control de la mosca sierra, de lo contrario, la plaga puede afectar una considerable extensión del bosque destinado al manejo forestal.

Palabras clave: kernel, *Pinus chiapensis*, Ixtlán, Ixtepeji, Zochina.

INTRODUCCIÓN

México es uno de los países con mayor biodiversidad y donde existen varios de los tipos de vegetación terrestre natural que suman una superficie cercana a los 140 millones de hectáreas (CONAFOR 2007). Los bosques mexica-

nos han sido afectados por plagas y enfermedades, lo que ocasiona pérdidas económicas en el sector forestal. Además, deformaciones, pérdidas de crecimiento y muerte del arbolado (Nolasco 2014, Suárez-Mota *et al.* 2018).

La Sierra Norte de Oaxaca (SNO), ubicada al norte de la ciudad capital del estado, es considerada como una

de las áreas con mayor biodiversidad en México, además de ser una de las pocas Sierras Mexicanas poseedoras de bosques en buen estado de conservación, lo cual, se debe en parte al manejo forestal que las comunidades locales realizan para el aprovechamiento de los recursos naturales (Merino 2018). Una de las principales amenazas para los recursos forestales, son las plagas, que se han hecho presentes en la SNO desde hace varios años (Castellanos-Bolaños *et al.* 2013).

Recientemente, desde el 2015 se ha registrado en la región la presencia de un insecto defoliador de la familia Diprionidae. Esta especie de avispa se conoce comúnmente como “mosca sierra” (Suárez-Mota *et al.* 2018). Este insecto se alimenta de especies de árboles del género *Pinus*, que poseen alto valor económico en la región (SEMARNAT 2015). Su presencia representa una amenaza creciente para los bosques de pinos. Los efectos sobre los árboles varían según la severidad del ataque, llegando a ocasionar la muerte de masas arbóreas completas, lo cual significaría pérdidas económicas, además alteraciones ecológicas.

La mosca sierra se ha registrado desde hace años en los estados del norte de México, región donde se conocen algunas especies del género *Zadiprion* (Diprionidae; Smith *et al.* 2012). Sin embargo, en la SNO, se registra la presencia de esta plaga identificada por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR datos no publicados) como *Zadiprion falsus* Smith, misma que no cuenta con información precisa para tomar medidas de mitigación y prevención que se adapten a las condiciones locales y así evitar su expansión (Álvarez-Zagoya y Díaz-Escobedo 2007).

Se reportó inicialmente que la especie que afecta en la SNO era *Zadiprion falsus*, desde el 2015 se empezaron a observar brotes atípicos y se han ido incrementando en un promedio del 400 % al año, en un contexto de sequía y cambio climático (Suárez-Mota *et al.* 2018). Sin embargo, al realizar distintos análisis, pruebas y reconocimientos de la especie expertos en plagas forestales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), así como el uso de claves taxonómicas, se identificaron individuos colectados en diversas localidades de la SNO como pertenecientes a la especie *Zadiprion howdeni* Smith (Smith *et al.* 2012), González y Sánchez (2018) y Suárez-Mota *et al.* (2018) mencionan además, que ambas especies poseen características morfológicas muy similares entre sí, por ello, la forma más certera de diferenciar entre una y otra en adultos es mediante la disección del abdomen de las hembras, para poder observar la lanceta de su ovipositor, donde el número y forma de las sérrulas indica qué especie está siendo observada (Smith *et al.* 2012).

La especie defoliadora distribuida en la SNO ha ocasionado una afectación alrededor de 3.900 ha, en tres comunidades con aprovechamiento forestal, amenazando con extenderse y ocasionar mayores daños económicos (Suárez-Mota *et al.* 2018). Las comunidades con mayor afectación son: Nuevo Zoquiapam, Ixtlán de Juárez y San-

ta Catarina Ixtepeji, lo que involucra una oportunidad de estudio de esta especie y con ello la adquisición de nuevos conocimientos acerca de su distribución.

Dentro de los métodos actuales para estimar la distribución geográfica real y potencial de las especies, el modelado de nicho ecológico (MNE) se puede considerar como el más adecuado (Guisan y Thuiller 2005). El MNE se basa en la interacción especie-ambiente, mediante predicciones con los registros de presencia de la especie e información de factores ambientales, funciona como una herramienta que ayuda a analizar los elementos ecológicos disponibles y permite estimar la distribución de una especie, de esta forma es posible proyectar geográficamente su área potencial disponible (Hijmans *et al.* 2005, Guisan y Thuiller 2005). Para Soberón y Nakamura (2009) el conjunto de métodos llamados modelaje de distribución de especies, de hábitat o del nicho tiene un propósito similar, identificar los sitios adecuados para la supervivencia de las poblaciones de una especie en particular.

Mediante el análisis de los modelos de nicho, es posible calcular la probabilidad de ocurrencia de las especies en un espacio geográfico definido (Guisan y Thuiller 2005, Soberón y Nakamura 2009). Una herramienta actual que ha demostrado ser útil y eficiente para generar modelos de distribución de especies es el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), cuya finalidad es estimar distribuciones de probabilidad sujeto a restricciones de los parámetros ambientales proporcionados, utilizando los datos de presencia y las variables ambientales asociadas a cada uno de los puntos de ocurrencia (Elith *et al.* 2006, Phillips *et al.* 2006).

Este estudio se plantea con el objetivo de poder determinar cuáles son las variables edafoclimáticas que tienen mayor contribución en la distribución potencial de *Zadiprion* ssp. en localidades de actividad forestal localizadas en la Sierra Norte de Oaxaca, a partir de modelos de nicho ecológico, así como determinar que variables edafológicas tienen mayor incidencia ecológica para la especie analizada, con la finalidad de brindar información que sirva como una herramienta útil para formular estrategias o técnicas para su prevención y control.

MÉTODOS

Área de estudio. La SNO es una de las ocho grandes regiones que integran el estado de Oaxaca, comprende un territorio con alta riqueza forestal. Se ubica dentro de las coordenadas 16°58' y 17°48' de latitud N y -95°8' y -96°47' de longitud W e incluye las regiones de La Chinantla, Sierra Mazateca, Sierra Mixe y Sierra de Juárez. La SNO cuenta con 68 municipios divididos en tres distritos: Ixtlán, Mixe y Villa Alta (figura 1). Es una región importante por su compleja fisiografía que incluye 34 tipos de vegetación diferentes (INEGI 2015). La superficie que comprende esta región estimada en este trabajo es de aproximadamente 8.925,7 km².

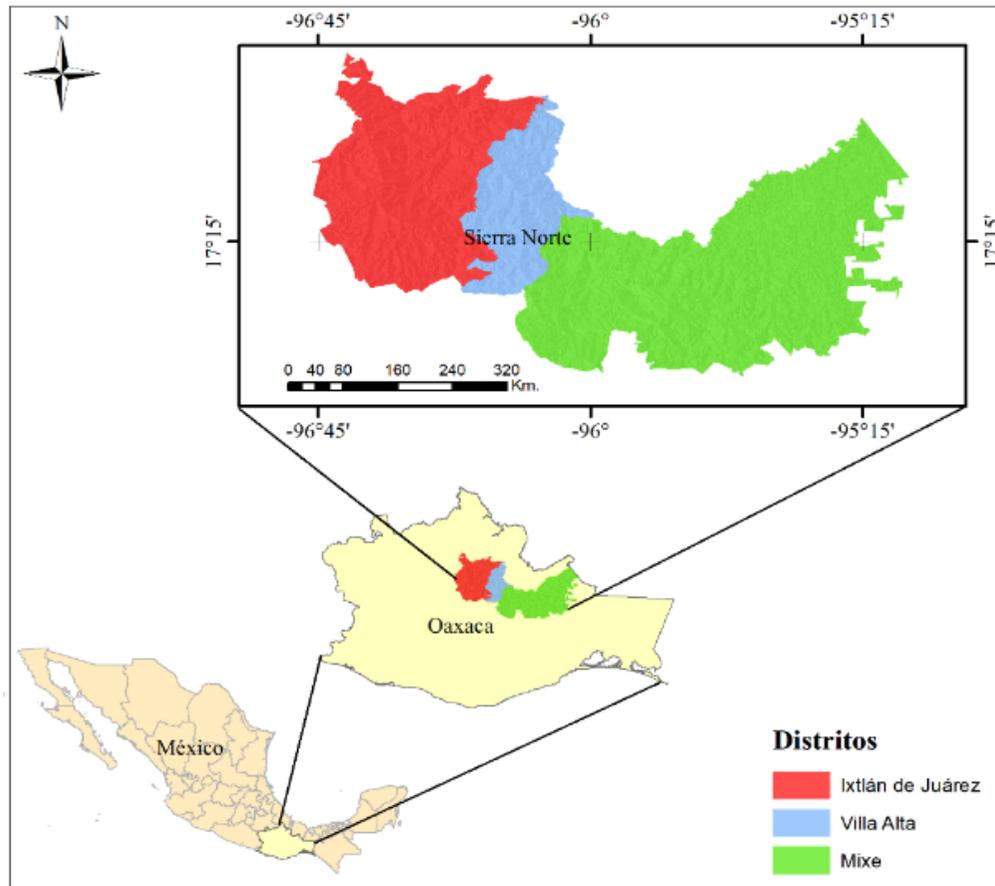


Figura 1. Ubicación geográfica de la Sierra Norte de Oaxaca y los tres distritos que la componen. Datum y proyección WGS 84.
The geographic location of the Sierra Norte de Oaxaca and the three districts that compose it.

Identificación de la especie. Para la identificación, se consultó la clave propuesta por Smith *et al.* (2012) para comparar las características que presentaban los especímenes recolectados con los descritos por esos autores. Para el caso de la SNO, los individuos colectados fueron identificados en la Universidad de la Sierra Juárez, donde se observó con un microscopio estereoscópico que existen ejemplares correspondientes a diferentes especies del género *Zadiprion* (figura 2), cuentan con sérrulas en la lanceta y carecen de la primera de inferior tamaño que debe poseer para ser considerada como *Zadiprion falsus* (Smith *et al.* 2012, González y Sánchez 2018). Además de que estos caracteres señalan que se trata de una especie diferente a *Zadiprion howdeni*, que previamente ha sido reportada en la región (Suárez-Mota *et al.* 2018).

Los datos de presencia de la especie fueron colectados en un periodo de cuatro años (2017-2021). En recorridos en las diferentes localidades de la SNO, en cada sitio se establecieron cinco subparcelas de 1 m², en las que se recolectaron de manera manual pupas de la especie presentes en la materia orgánica del suelo a una profundidad de cinco a 20 cm en cada subparcela, posteriormente las muestras colectadas se introdujeron en bolsas de plástico con eti-

quetas y se realizó la clasificación del insecto de acuerdo a la fase en que fue hallado en el sitio: larva, pupa y adulto. Se georreferenciaron los sitios de muestreo con un geoposicionador (GPS, Garmin eTrex 20x[®]) y se estructuró una base de datos que posteriormente se analizó en un sistema de información geográfica (SIG; ArcMap 9.3).

Análisis de suelo. Para obtener las muestras de suelo se consideraron sitios de las áreas afectadas, se tomó una sola muestra en aquellas zonas cuyas características topográficas y de composición o presencia de especies fueran similares o con pocos individuos afectados y dos o más muestras en las zonas que presentaran distintas características topográficas, las especies arbóreas presentes fueran distintas y hubiera una mayor superficie de afectación. Una vez colectadas las muestras de suelo se procedió a secarlas a la intemperie. Las muestras secas fueron transportadas al laboratorio para el análisis físico y químico con el método de la FAO (2018).

Índice de densidad de Kernel. Para determinar los valores de las variables edafológicas en los cuales ocurren los óptimos de presencia máxima, se utilizó la función de

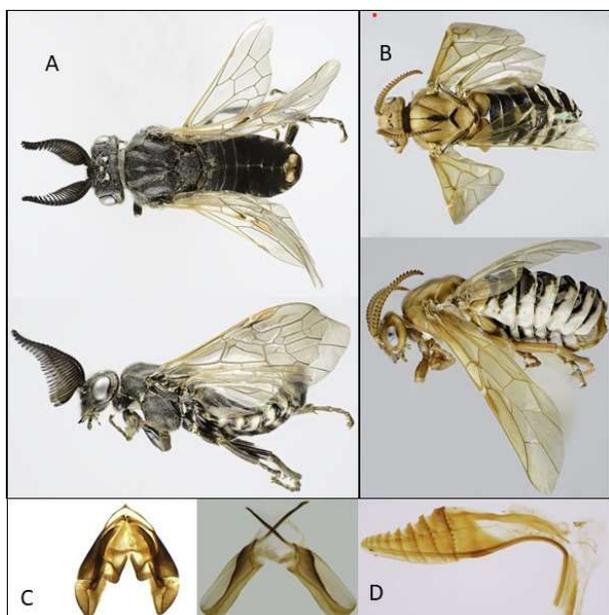


Figura 2. Ejemplares de la especie de *Zadiprion* spp. que afecta los bosques de pino en la Sierra Norte de Oaxaca. A) Vistas lateral y dorsal del macho, B) Vistas lateral y dorsal de la hembra, C) Valva genital y válvula peneana del macho y D) ovopositores de la hembra.

Specimens of the species of *Zadiprion* spp. that affects pine forests in the Sierra Norte de Oaxaca. A) Lateral and dorsal views of the male, B) Lateral and dorsal views of the female, C) Genital valve and penile valve of the male and D) ovipositors of the female.

densidad de probabilidad de Kernel. Este es un modelo no paramétrico que muestra la simetría y multimodalidad de los datos con las funciones limitadas por sus parámetros (Parzen 1961). Con la curva de densidad de Kernel se delimitaron los intervalos de la tasa de presencia máxima de cada variable de las muestras de suelo. Los análisis se realizaron en el entorno R-Project, se emplearon las paqueterías SM, Rgdal, foregin y kernSmooth, con un nivel de significancia de 0,001 (R Development Core Team 2008).

Análisis de similitud. Para identificar cuáles son las variables edafológicas con mayor importancia para el establecimiento y desarrollo exitoso de la mosca sierra en su fase de pupa, se realizó una matriz de datos generada con los valores obtenidos del análisis de suelos. Con el programa PATN ver. 3.0 se realizó una clasificación jerárquica de datos con la métrica de Gower (1971), sugerida por Belbin (1995). Con este índice se puede determinar el grado de semejanza entre los sitios de muestreo, y de esta forma distinguir las variables que tienen en común los suelos donde se presentan afectaciones por *Zadiprion* sp.

Modelos de nicho ecológico. En la modelación de nicho ecológico se utilizó el programa MaxEnt v. 3,3,3 (Elith *et al.* 2006, Phillips *et al.* 2006). Los datos fueron configurados con las características siguientes: El forma-

to de salida logístico porque de acuerdo con (Phillips y Dudik 2008) permite una interpretación biológica más fácil de la probabilidad estimada de ocurrencia de una especie dadas las restricciones impuestas por las variables ambientales, se usó 10.000 puntos al azar como datos de fondo más los de ocurrencia para determinar la distribución de la mosca sierra, se emplearon el 25 % de datos para prueba y el 75 % de entrenamiento con 10 réplicas. La evaluación de los modelos se hizo con los resultados del análisis del área bajo la curva (AUC) y la prueba binomial de la Característica Operativa del Receptor (ROC por sus siglas en inglés). Por último, los archivos tipo ASCII generados por MaxEnt fueron importados a un SIG para su edición y generación de los modelos en modo binario (presencia-ausencia) empleando como umbral de corte el *Maximum training sensitivity plus specificity*.

Capas ambientales. La parametrización estuvo basada en 19 variables bioclimáticas extraídas del portal WorldClim, con una resolución espacial de 1 km² aproximadamente (Hijmans *et al.* 2005). Los modelos generados se analizaron en el SIG. La reducción de capas ambientales para una segunda modelación se llevó a cabo mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado con el paquete estadístico R. Esta clasificación mostró cuales son las variables en las que se distribuye la mayor parte de la varianza total, y con ellas generar el segundo modelo de distribución potencial, empleando solo las variables con menor autocorrelación, debido a que son las más significativas en distribución de la especie analizada.

RESULTADOS

Identificación de la especie. Después de realizar repetidas observaciones microscópicas de los órganos reproductores de distintos ejemplares de mosca sierra (figura 2), se observaron las sérrulas por individuo hembra, lo cual indica que dichos ejemplares pertenecen a especies diferentes de *Zadiprion howdeni*, que previamente ha sido reportada (Suárez-Mota *et al.* 2018).

Datos obtenidos. A partir de los datos de 18 sitios seleccionados (cuadro 1) de nueve comunidades de la SNO, en las cuales existe evidencia de daños provocados por *Zadiprion* sp., se obtuvo que las comunidades con mayor área foliar afectada fueron San Pedro Nexicho y Santa Catarina Ixtepeji, por ello se tomaron cuatro y tres muestras, respectivamente, en distintas áreas dentro de su territorio. Yuvila también mostró daños importantes, sin embargo, las condiciones climáticas y la dificultad para acceder a los terrenos dañados hicieron factible la obtención de una muestra (cuadro 1).

Especies arbóreas afectadas. Los árboles observados en campo con signos de presencia de ataque por el defoliador pertenecen a las especies *Pinus pseudostrobus* var.

Cuadro 1. Sitios seleccionados para colectas de muestras de suelo y obtención de datos para elaboración de modelos de distribución potencial.

Selected sites for collecting soil samples and obtaining data for potential distribution modeling.

N° muestra	Comunidad	Longitud	Latitud
1	Sta. Catarina Ixtepeji	-96° 35' 30,2''	17° 12' 36,0''
2	San Pedro Nexicho	-96° 35' 20,3''	17° 15' 57,5''
3	San Pedro Nexicho	-96° 35' 23,8''	17° 16' 02,1''
4	San Pedro Nexicho	-96° 35' 30,5''	17° 15' 54,8''
5	San Pedro Nexicho	-96° 35' 31,2''	17° 15' 52,0''
6	La cumbre Ixtepeji	-96° 38' 14,3''	17° 11' 44,8''
7	Jaltianguis	-96° 30' 56,5''	17° 21' 08,6''
8	Jaltianguis	-96° 30' 55,6''	17° 21' 09,1''
9	Santa Matha Latuvi	-96° 30' 55,3''	17° 10' 47,6''
10	Santa Matha Latuvi	-96° 30' 55,3''	17° 10' 47,6''
11	La Trinidad	-96° 24' 44,9''	17° 15' 58,4''
12	La Trinidad	-96° 24' 56,8''	17° 15' 35,4''
13	San Pablo Macuilianguis	-96° 33' 57,8''	17° 32' 09,8''
14	San Pablo Macuilianguis	-96° 33' 45,2''	17° 32' 13,5''
15	Yuvila	-96° 34' 30,3''	17° 09' 09,8''
16	Sta. Catarina Ixtepeji	-96° 34' 51,4''	17° 14' 54,2''
17	Ixtlán de Juárez	-96° 28' 44,2''	17° 22' 26,0''
18	Ixtlán de Juárez	-96° 28' 36,8''	17° 21' 30,8''

oaxacana (Mirov), *Pinus patula* Schlecht & Cham, *Pinus teocote* Schlecht & Cham, *Pinus devoniana* Lindl., *Pinus leiophylla* Schiede ex Schetdl. & Cham. y recientemente se registran afectaciones en *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen y *Pinus oocarpa* Schiede ex Schetdl.

Análisis de suelo. Con los resultados de las pruebas de color y textura de suelo de los 18 sitios analizados, en general se puede observar que predominan colores amarillentos y cafés, con presencia de una muestra en tonalidades grisáceas. De igual forma, todos los suelos presentan un porcentaje alto de gravas en su composición, lo cual repercute directamente en otros parámetros como la dispersión y condición de los sitios.

Los resultados de las pruebas de consistencia, adhesividad, plasticidad y textura en los 18 sitios, la mayoría de los suelos muestreados se identifican como plásticos y adhesivos en alguna de sus variantes. Estas propiedades están directamente relacionadas con la consistencia y textura, ya que dependen de la humedad que guarda el suelo y la interacción de sus componentes. Solo el suelo perteneciente a la localidad de La Cumbre se registró como blando, el resto de las muestras presentan una consistencia dura. De

igual forma al ser humedecidas, el 39 % se reporta como muy friable, el 33 % como firme, el 22 % como suelto y el 6 % como friable. En cuanto a su textura, el 44 % de los suelos pertenecen a la clasificación franco arenosa, el 28 % a la areno francosa, el 17 % a franco limosa y 11 % a franco arcillosa y arenas.

Los valores de densidad real siempre son superiores a los de densidad aparente, excepto, en los casos de la muestra número 3 y 14 correspondientes a San Pedro Nexicho y San Pablo Macuilianguis, respectivamente. La media para los valores de densidad aparente en los 18 sitios muestreados es de 1,13 g cm⁻³, en tanto que la densidad real es de 2,1 g cm⁻³ (cuadro 2). El porcentaje de porosidad varía considerablemente en los sitios, los valores más altos se registran en el sitio de La Trinidad, cuyos valores se encuentran por arriba del 80 %, mientras los valores más bajos los tienen dos muestras de Santa Catarina Ixtepeji y una de San Pedro Nexicho, con valores entre 8 y 11 %. Los valores más altos de infiltración fueron encontrados en la muestra número 10 de Santa Martha Latuvi, con 101,7 cm hr⁻¹, mientras el valor más bajo lo posee la muestra número 2 de San Pedro Nexicho con 17 cm hr⁻¹. La humedad presente en las muestras presenta valores que van en un

Cuadro 2. Valores de parámetros físicos: densidad, porosidad, infiltración, conductividad eléctrica (CE) y contenido de humedad (CH).
 Values of physical parameters: density, porosity, infiltration, electrical conductivity (CE) and moisture content (CH).

N°	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Densidad real (g cm ⁻³)	Porosidad (%)	Infiltración (cm hr ⁻¹)	Conductividad (CE) (ds m ⁻¹)	Contenido de humedad (CH) (%)
1	1,66	1,87	11,01	64,9	0,13	67,55
2	1,07	2,39	55,21	17,0	0,22	43,89
3	1,37	0,91	11,80	65,1	0,30	46,09
4	1,12	2,34	19,91	47,2	0,21	56,31
5	1,08	1,75	14,60	50,0	0,33	66,53
6	1,12	1,61	8,65	90,9	0,26	57,98
7	1,48	2,12	75,71	44,4	0,11	51,62
8	1,31	2,4	45,45	46,1	0,12	34,72
9	1,09	2,4	24,78	86,0	0,31	38,66
10	1,13	1,45	17,20	101,7	0,16	46,34
11	0,42	2,28	81,44	73,2	0,16	52,31
12	0,34	2,31	85,45	76,9	0,13	32,43
13	1,39	2,18	35,82	85,0	0,12	39,83
14	2,09	1,76	61,38	90,1	0,32	43,12
15	0,92	2,56	63,97	73,5	0,12	72,30
16	1,02	2,44	58,26	89,3	0,50	66,26
17	0,86	2,63	67,38	74,3	0,11	57,32
18	2,44	65,29	65,29	85,0	0,19	75,84

intervalo de 32,43 % hasta 75,84 %, encontrando que 10 de las 18 muestras poseen más del 50 % de humedad en sus suelos y únicamente dos de ellas poseen un nivel de humedad superior al 70 %, lo cual indica que los suelos colectados en las zonas afectadas por el defoliador poseen buenos niveles de humedad (cuadro 2). De igual forma, los resultados de la prueba de conductividad son menores a los 2,0 ds m⁻¹ en los 18 suelos colectados, lo cual los clasifica como no salinos.

Propiedades químicas. Los niveles de materia orgánica (MO) en los 18 sitios se encuentran en un intervalo que va de 2,42 % a 6,70 %. Los porcentajes de 13 muestras entran en la categoría de sitios ricos en MO, mientras que cuatro de ellos se posicionan en la categoría de moderadamente ricos, y uno más proveniente de San Pablo Macuilianguis en un nivel de contenido medio (Cuadro 3). La materia orgánica funciona de igual forma como un regulador del pH, los valores de esta propiedad fluctúan entre 4,88 y 7,73, en general, la media en los 18 sitios colectados es de un valor de 6,7, esto indica un pH neutro. Los valores de capacidad de intercambio catiónico total (CICT) de las 18 muestras, tienen valores que van de 7,14 a 57,56 cmol_c kg⁻¹ (cuadro 3).

Análisis de similitud. La similitud de los datos permitió la conformación de cinco grupos con características en común (figura 3A). Además, se obtuvo un diagrama de doble entrada (*two way*) que indica la incidencia de las variables en las agrupaciones antes mencionadas, así como la ponderación empleada en el índice de similitud de Gower, lo cual indica la homogeneidad entre los suelos muestreados, tal es el caso de la materia orgánica y textura, ambas variables están presentes con un valor de uno en los cinco grupos formados, esto quiere decir que dichas características se encuentran presentes de forma similar en los 18 sitios de las comunidades analizadas (figura 3B).

Los datos obtenidos con la densidad de Kernel mostraron los límites superior e inferior de cada una de las variables edafológicas analizadas. Por ejemplo, para las variables físicas como la infiltración, el nivel óptimo fluctúa entre 73 y 78 cm hr⁻¹. El porcentaje de humedad fluctúa entre el 30 y 70 % para los 18 sitios, pero el óptimo se localiza entre el 51 y 53 %, en tanto que la densidad real varía entre 1 y 3 gr cm⁻³ para todas las muestras, indicando una mayor definición entre 2,2 y 2,5 gr cm⁻³ (figura 4). Para las variables químicas como el pH, se tiene un óptimo entre valores de 6,6 y 6,8 (cuadro 4). El porcentaje de materia orgánica fue considerable, el valor óptimo se encuentra en-

Cuadro 3. Valores obtenidos con el análisis de parámetros químicos: pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico (CICT).

Values obtained with the analysis of chemical parameters: pH, organic matter and cation exchange capacity (CICT).

N°	Comunidad	pH	Materia orgánica (%)	Capacidad de intercambio catiónico total (CICT) (cmol _c kg ⁻¹)
1	Sta. Catarina Ixtepeji	6,66	6,11	37,15
2	San Pedro Nexicho	7,61	6,44	29,46
3	San Pedro Nexicho	7,73	6,70	31,41
4	San Pedro Nexicho	7,68	3,15	33,95
5	San Pedro Nexicho	7,83	6,70	27,90
6	La cumbre Ixtepeji	6,53	5,91	14,95
7	Jaltianguis	5,71	3,23	49,05
8	Jaltianguis	6,68	3,21	19,51
9	Santa Matha Latuvi	5,87	6,29	11,12
10	Santa Matha Latuvi	6,48	6,33	11,32
11	La Trinidad	4,88	6,11	31,69
12	La Trinidad	5,66	3,08	31,02
13	San Pablo Macuiltianguis	6,84	2,42	7,14
14	San Pablo Macuiltianguis	7,68	6,48	32,59
15	Yuvila	6,09	6,54	57,56
16	Sta. Catarina Ixtepeji	7,24	6,37	19,51
17	Ixtlán de Juárez	6,96	6,06	15,61
18	Ixtlán de Juárez	6,6	5,89	19,12
	Mínimo	4,88	2,42	7,14
	Promedio (±Desviación estándar)	6,71 (±0.84)	5,39 (±1,51)	26,67(±13,30)
	Máximo	7,83	6,7	57,56

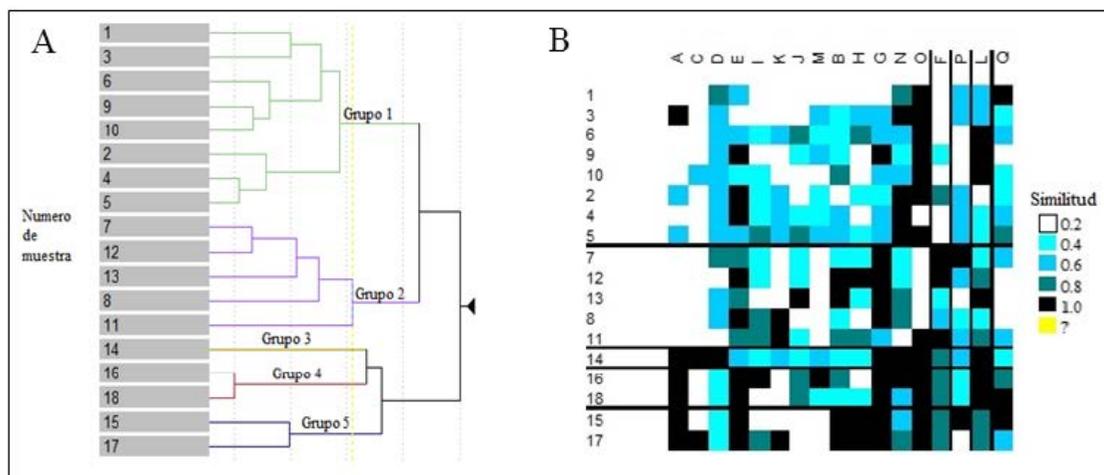


Figura 3. A) Dendrograma que indica el nivel de similitud en condiciones de suelo para las 18 muestras analizadas y B) Diagrama de doble entrada.

A) Dendrogram indicating the level of similarity in soil conditions for the 18 samples analyzed and B) Double entry diagram.

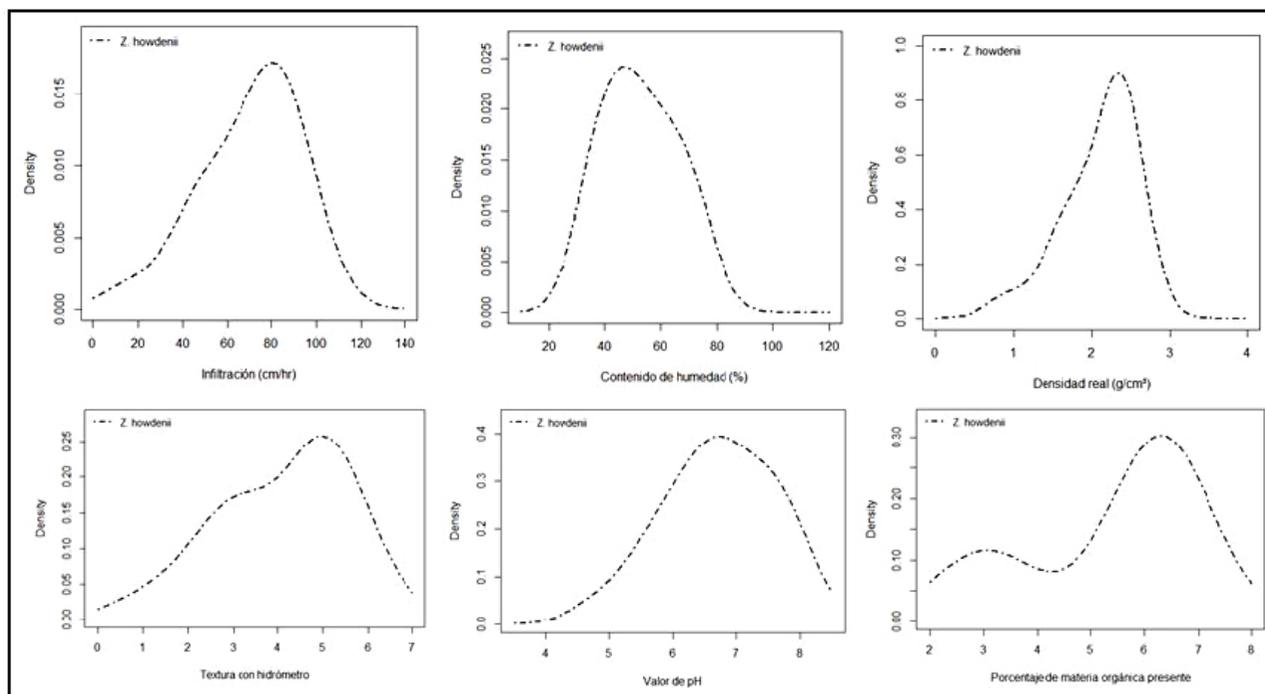


Figura 4. Intervalos óptimos obtenidos con la función de densidad de Kernel para las variables físicas y químicas de suelo.
 Optimal ranges were obtained with the Kernel density function for the physical and chemical variables of the soil.

Cuadro 4. Intervalos óptimos de variables edafológicas para el desarrollo de *Zadiprion* spp.
 Optimal intervals of edaphological variables for the development of *Zadiprion* spp.

	Variables								
	DA (gr cm ⁻³)	DR (gr cm ⁻³)	P (%)	I (cm hr ⁻¹)	CE (ds m ⁻¹)	pH	MO (%)	CICT (cmol _c kg ⁻¹)	H (%)
L. I.	0,34	0,91	8,65	16,98	0,11	4,8	2,42	7,14	32,43
Óptimo	1-1,3	2,2-2,5	50-55	73-78	0,1-0,3	6,6-6,8	6-6,3	28-30	51-53
L. S.	2,09	2,63	85,4	101,6	0,5	7,8	6,7	57,56	75,8

L.I: Límite inferior, L.S: Límite superior, DA: Densidad aparente, DR: Densidad real, P: Porosidad, I: Infiltración, CE: Conductividad Eléctrica, MO: Materia orgánica, CICT: Capacidad de intercambio catiónico total, H: Humedad.

tre 6 y 6,3 %, registrando un subóptimo entre 2,5 y 3,5 % (figura 4).

Modelo de nicho ecológico. La distribución conocida y potencial de *Zadiprion* spp. se analizó mediante su modelación para ello, se tuvo como base el trabajo de Suárez-Mota *et al.* (2018). Se hicieron dos modelos. El primero de ellos incluyó el total de 19 variables climáticas (cuadro 5). Dicho modelo generó un AUC de 0,934, lo cual indica que la idoneidad del hábitat para la presencia y desarrollo de *Zadiprion* spp. fue muy bueno (Suárez-Mota *et al.* 2018). Sin embargo, con la finalidad de reducir la colinealidad entre las variables y definir cuáles

son las que tienen mayor significancia en el modelo se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Este caso se han considerado tres componentes que, conjuntamente explican el 93,2 % de la varianza total (cuadro 5). A partir de estos componentes fueron seleccionadas las variables climáticas con mayor contribución para la generación del segundo modelo de la especie estudiada.

El modelo de distribución potencial obtenido con las variables seleccionadas tuvo un valor de AUC de 0,944, lo cual indica que, al igual que el primer modelo, la idoneidad del hábitat para la presencia y desarrollo de la mosca sierra es muy bueno, este modelo final muestra en general, la probabilidad de distribución para la mosca sierra en los tres distritos (figura 5).

Cuadro 5. Variables climáticas utilizadas y valores de contribución por componente. En mayúscula los acrónimos de las variables con mayor contribución.

Climate variables used and contribution values by component.

Acrónimo	Variable	Componente		
		1	2	3
Bio01	Temperatura promedio anual	0,785	0,381	0,473
Bio02	Oscilación diurna de la temperatura	0,407	0,602	0,540
Bio03	Isotermalidad	-0,319	-0,407	-0,767
Bio04	Estacionalidad de la temperatura estacional	0,556	0,378	0,71
Bio05	Temperatura máxima del periodo más cálido	0,709	0,459	0,527
Bio06	Temperatura mínima del periodo más frío	0,860	0,304	0,341
Bio07	Oscilación anual de la temperatura	0,409	0,572	0,666
Bio08	Temperatura promedio del trimestre más húmedo	0,771	0,387	0,490
Bio09	Temperatura promedio del trimestre más seco	0,792	0,395	0,438
Bio10	Temperatura promedio del trimestre más cálido	0,764	0,390	0,500
Bio11	Temperatura promedio del trimestre más frío	0,815	0,379	0,42
Bio12	Precipitación anual	-0,884	-0,395	-0,204
Bio13	Precipitación del periodo más húmedo	-0,933	-0,186	-0,26
Bio14	Precipitación del periodo más seco	-0,557	-0,786	-0,086
Bio15	Estacionalidad de la precipitación	0,233	0,919	0,195
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo	-0,923	-0,269	-0,206
Bio17	Precipitación del trimestre más seco	-0,776	-0,533	-0,311
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido	0,131	-0,136	0,762
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	-0,636	-0,705	0,007

DISCUSIÓN

Las similitudes morfológicas entre las distintas especies de mosca sierra dificultan la identificación en campo. De igual forma las condiciones ambientales para su sobrevivencia suelen ser similares, no solo entre especies, sino entre géneros, por lo cual, cabe la posibilidad de que en un mismo sitio puedan coexistir distintos taxa, pertenecientes a otros géneros, compartiendo afinidad por características ambientales favorecedoras y hábitos alimenticios similares (González y Sánchez 2018). La forma de diferenciarlas correctamente es mediante un análisis microscópico de los aparatos reproductivos de los adultos, específicamente de las hembras, porque en ellos se pueden apreciar y diferenciar las estructuras interiores, lo cual facilita su identificación (Smith *et al.* 2012, González *et al.* 2014).

Algunas veces se intenta diferenciar a las especies por su apariencia en estado larvario, cuando su captura es un poco más sencilla, sin embargo, las características físicas en esta etapa suelen ser parecidas entre organismos del mismo género aun siendo observadas microscópicamente, prueba de ello es la confusión habida al identificar la especie presente en la SNO, pues durante los primeros brotes

en el 2016 la CONAFOR mencionó que se trataba de *Zadiprion falsus*, con estos datos Suárez-Mota *et al.* (2018) iniciaron un estudio de distribución y estimación de las áreas afectadas por el defoliador en la SNO y mediante varias observaciones de las estructuras reproductivas se identificó a la especie epidémica como *Zadiprion howdeni* (Sánchez, comunicación personal, figura 2).

Análisis con colecta de ejemplares posteriores han permitido reconocer que, en la SNO, se encuentran otras especies del género *Zadiprion* que aún faltan de identificar incluso algunas no coinciden con los caracteres de especies incluidas en diversas claves taxonómicas (Smith *et al.* 2012, González *et al.* 2014). Algunas personas experimentadas pueden diferenciar el estado larvario en campo, conociendo los hábitos y la coloración del cuerpo, sin embargo, esto ayuda a diferenciar entre géneros, más no entre especies (González *et al.* 2014).

Los insectos defoliadores de la familia Diprionidae tienen en común una predilección por la depredación de uno o dos hospederos regionales y en pocas ocasiones afecta a otras especies de pinos (González y Sánchez 2018). En la SNO, el defoliador *Zadiprion* spp. que afecta los bosques ha mostrado preferencias hacia dos especies de

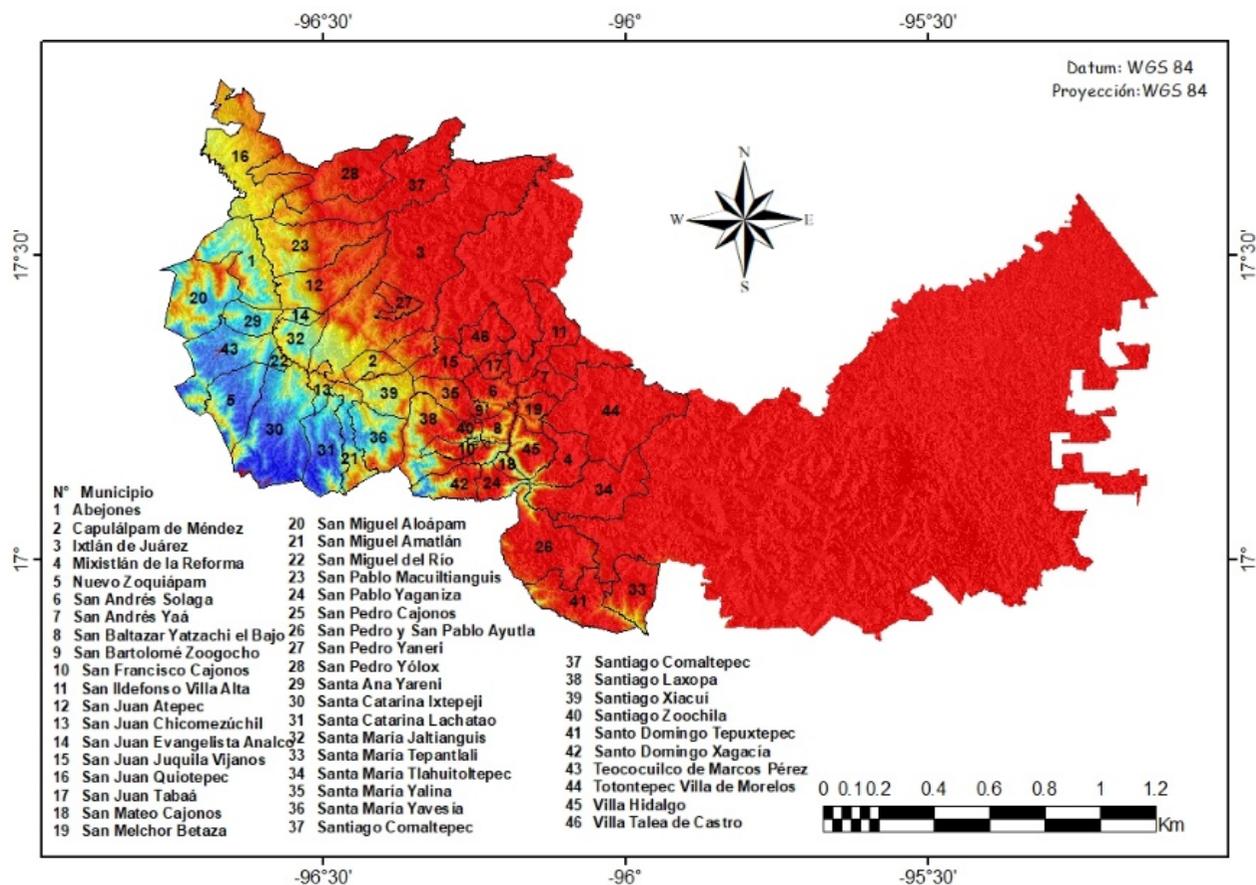


Figura 5. Comunidades afectadas y potencialmente afectables (por clave municipal según la clasificación estatal) reconocidas con la distribución potencial de *Zadiprion* spp. En azul la mayor y rojo menor probabilidad de ocurrencia de la especie.

Affected and potentially affected communities (by municipal code according to state classification) recognized using the potential distribution of *Zadiprion* spp.

suma importancia para la región, en primer lugar, *Pinus pseudostrubus*, seguido de *Pinus patula*. Dichas especies son principalmente utilizadas para actividades silvícolas, además de estar presentes en prácticamente todo el territorio y ser la vegetación característica de las comunidades serranas, lo cual es sumamente importante en las actividades recreativas, turísticas y ecoturísticas que finalmente repercuten en la economía local y regional (SEMARNAT 2015). Con los datos obtenidos se pueden notar daños en algunas ocasiones a otras especies como *Pinus teocote*, *Pinus devoniana* y *Pinus leiophylla*, sin embargo, estos se observaron solo en tres comunidades, se considera que las afectaciones presentes en otras especies fueron debidas a la cercanía física de estas con los hospederos preferenciales, *P. pseudostrubus* y *P. patula*.

Los daños ocasionados por las plagas forestales y en este caso los defoliadores son factores que coadyuvan al análisis del impacto ambiental que tienen estos sucesos en el funcionamiento de los bosques, además del daño ocasionado a las distintas especies vegetales y animales, así como la contaminación del suelo y los mantos acuíferos

causados por los insecticidas comúnmente aplicados mediante dispersión aérea (Devine *et al.* 2008).

Los problemas derivados de las dificultades técnicas para el control de la plaga, se hacen más notoria la importancia de identificar otro tipo de acciones de combate y prevención, no solo durante la fase adulta o larvaria del insecto, también hay que considerar la importancia debida a la etapa de pupa, cuando se lleva a cabo la metamorfosis de larva a adulto (Suárez-Mota *et al.* 2018). Por ejemplo, en Ixtlán de Juárez y Santa María Jaltianguis, se realizaron quemas controladas en las áreas con mayor afectación, con la confianza de que la exposición a altas temperaturas limitara el desarrollo del insecto en su fase de pupa, y con ello mermar la cantidad de insectos en su próximo ciclo de vida.

Durante la etapa de pupa (estar en el suelo) el insecto se encuentra vulnerable y al alcance de las actividades humanas, ya que, durante la dispersión y proceso de defoliación, su control es un tanto más complejo por la altura a la que suelen encontrarse las larvas. Por ello, es de suma importancia conocer las variables edafológicas que poseen los suelos donde la mosca sierra ha tenido éxito para con-

cluir esta parte de su desarrollo, que principalmente, como mostró este estudio, son la materia orgánica, la humedad y la textura del suelo, y así conocer un poco más acerca de la naturaleza de este insecto en la región, para tener un panorama más amplio de las condiciones que el insecto requiere para sobrevivir.

El análisis físico - químico realizado a los suelos colectados en 18 sitios, ha mostrado los niveles de parámetros importantes en los cuales *Zadiprion* spp. se desarrolla con éxito. Todos los elementos tienen cierta importancia para que el ciclo metamórfico se pueda realizar, dentro de ellos, la estructura, textura e infiltración del suelo, cuyos efectos son para beneficio de la mosca sierra, son similares, impactando en la humedad. Otra característica hallada en los suelos analizados fue la baja conductividad eléctrica, que está positivamente relacionado con el desarrollo de las distintas formas de vida (Castellanos *et al.* 2000), esto representa ventajas y desventajas para este insecto, debido a que, así como favorece a su desarrollo, lo hace para organismos depredadores, lo cual, podría representar un mecanismo de control biológico que ayude a mermar la cantidad de individuos emergentes.

El análisis químico se centró únicamente en tres parámetros de importancia. La razón de no analizar más variables fue porque estas características influyen mayormente en las plantas, ya que los nutrientes que ellas necesitan los toman directamente del suelo y la composición química de este influye positiva o negativamente sobre su crecimiento y desarrollo (Castellanos *et al.* 2000). Para el caso del insecto, el suelo únicamente es un sitio de resguardo durante una etapa de transición, no se alimenta de él ni realiza alguna otra función, por lo cual, para la mosca sierra, las características físicas del suelo son de mayor relevancia que las químicas (González y Sánchez 2018).

A partir del análisis, se puede destacar que la materia orgánica del suelo crea una condición de “capa protectora” para la mosca sierra durante su fase de pupa contra el impacto de las gotas de lluvia, las heladas y el viento, que pueden remover el suelo y en este caso desenterrar las pupas y exponerlas a la intemperie al inicio y durante de los meses más fríos del año, hasta el inicio de la temporada de lluvias (González y Sánchez 2018).

Con los datos obtenidos en los análisis de similitud (figura 3). Se formaron cinco grupos por distintas comunidades. Lo lógico sería que las muestras provenientes de las mismas comunidades quedarán en el mismo grupo, esto se cumplió con las muestras provenientes de San Pedro Nexicho, Latuvi, Jaltianguis y La Trinidad, sin embargo, Ixtepeji, Macuiltianguis e Ixtlán se distribuyeron en dos grupos distintos. Con todo lo antes mencionado, se puede deducir que las diferencias entre los sitios de las mismas comunidades y las similitudes con los suelos de otros sitios están directamente relacionadas con las condiciones de vegetación y terreno en las cuales se encuentran los sitios de muestreo que no por estar ubicados dentro del mismo territorio, tienen que ser iguales, debiéndose eGGstas di-

ferencias a la influencia de distintos factores derivados de la misma naturaleza de los ecosistemas o de actividades antropogénicas (Phillips 1998, Buol *et al.* 2011).

Además de indicar la similaridad entre los sitios de muestreo, el análisis de doble entrada, muestra cuales son las variables que tienen mayor contribución en el análisis de similitud para la conformación de los grupos mencionados (figura 5B). Los límites superior e inferior, así como el óptimo de cada variable analizada, indican cuales son las mejores condiciones del suelo en las cuales *Zadiprion* spp. puede concretar exitosamente su fase de metamorfosis de larva a adulto. Todas estas variables juegan un papel importante con la conformación del suelo, así como de la materia orgánica, por mencionar algunos ejemplos, con los cuales es posible comprender la estrecha relación existente entre las variables que tienen mayor importancia en el desarrollo del insecto.

Mediante el análisis de densidad de Kernel se obtuvieron los rangos de valores edafológicos idóneos en los cuales la mosca sierra tiene mejores condiciones para concluir su metamorfosis. De acuerdo con los valores mostrados en el cuadro 3, se sabe que *Zadiprion* spp. puede establecerse en suelos cuya densidad aparente se encuentre entre los 0,34 y los 2,09 gr/cm³, sin embargo, estos valores no garantizan la conclusión exitosa de la transición del estado larvario al adulto, únicamente son los rangos de valor en los cuales se ha reportado la presencia del insecto en la Sierra Norte de Oaxaca.

Así como las características edafológicas reflejan amplia importancia en una fase del ciclo de vida de *Zadiprion* spp, las variables climáticas juegan un papel fundamental en la distribución de la especie durante todo su ciclo de vida (Suárez-Mota *et al.* 2018). Por ello, los modelos de distribución potencial fueron generados utilizando datos climáticos de temperatura y precipitación. Para tener un modelo con información resumida y más detallada, (figura 5) se realizó con el fin de obtener datos que evalúen con mayor detalle las características que determinan la distribución de *Zadiprion*, mostrando cuales son las variables que mejor expresan la distribución. Esto, en conjunto con el conocimiento acerca de las características edafológicas favorecedoras para el desarrollo de la mosca sierra, forman un conjunto de nuevos conocimientos para el manejo y control de la plaga en la Sierra Norte, dando información útil que puede servir como parteaguas para nuevas investigaciones y otros métodos de control dirigidos a zonas específicas, priorizando la supervisión en aquellas áreas con altos niveles de probabilidad de ocurrencia.

REFERENCIAS

Álvarez-Zagoya R, VM Díaz-Escobedo. 2007. Enemigos naturales de la mosca sierra *Zadiprion falsus* Smith (Hymenoptera: Diprionidae) en Durango. Memorias del XIV Simposio Nacional de Parasitología Forestal. Aguascalientes,

- México. Fundación Produce Aguascalientes - SEMARNAT - CONAFOR - INIFAP. p. 137-143.
- Belbin L. 1995. PATN analysis package. Blatant fabrications Pty Ltd. Tasmania, Australia. 85 p.
- Buol SW, RJ Southard, RC Graham, PA McDaniel. 2011. Soil genesis and classification. 6 ed. Iowa, USA. Wiley-Blackwell. 543 p.
- Castellanos-Bolaños JF, EO Ruiz-Martínez, M Gómez-Cárdenas, R González-Cubas. 2013. Fundamentos técnicos para el control de insectos descortezadores de pinos en Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Oaxaca, México. Folleto Técnico 40. 31 p.
- Castellanos JZ, BJX Uvalle y SA Aguilar. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2 ed. Colección INCAPA. 31 p. (Folleto Técnico 40).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, MX). 2007. Manual de sanidad forestal. Coordinación general de conservación y Restauración. Gerencia de sanidad forestal. 1 ed. Zapopan Jalisco, México. 76 p.
- Devine JG, E Dominique, E Oigusucu, MJ Furlong. 2008. Uso de insecticidas: contexto y consecuencias ecológicas. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 25(1): 74-100. Consultado 2 mar. 2021. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000100011&lng=es
- Elith J, CH Graham, RP Anderson, M Dudík, S Ferrier, A Guisan, R Hijmans, F Huettmann, JR. Leathwick, A Li, J Lehmann, LG Lohmann, BA Loiselle, G Moritz, M Nakamura, Y Nakazawa, J Overton, AT Peterson, SJ Phillips, KS Richardson, R Scachetti-Pereira, RE Schapire, J Soberón, S Williams, MS Wisz, NE Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2018. Textura del suelo. Consultado 20 mar. 2021. Disponible en http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm
- González GE, G Sánchez. 2018. Identificación y manejo de moscas sierra de la familia Diprionidae presentes en el centro norte de México. Aguascalientes, México. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal (CONACYT-CONAFOR). 122 p.
- González GE, F Bonilla, S Quiñones, G Sánchez, F Tafoya, MP España, J Lozano, S Robles. 2014. Guía para la identificación de moscas sierra de la familia Diprionidae presentes en el centro norte de México. Aguascalientes, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. 36 p.
- Gower J. 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics* 27: 857-872. DOI: <https://doi.org/10.2307/2528823>
- Guisan A, W Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8(9): 993-1009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00792.x>
- Hijmans RJ, SE Cameron, JL Parra, PG Jones, A Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, MX). 2015. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie VI (capa unión).
- Merino PL. 2018. Comunidades forestales en México. Formas de vida, gobernanza y conservación. *Revista Mexicana de Sociología* 80(4): 909-940. Consultado 13 may. 2021. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32158243007>
- Nolasco GA. 2014. Defoliadores de coníferas de los géneros de *Zadiprion* spp., y *Neodiprion* spp. existentes en México. Monografía presentada para obtener el título de Ingeniero Forestal. Saltillo, México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 84 p.
- Parzen E. 1961. An approach to time series analysis. *Annals of Mathematical Statistics* 32(4): 951-989. DOI: [10.1214/aoms/1177704840](https://doi.org/10.1214/aoms/1177704840)
- Phillips JD. 1998. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation. *Geoderma* 86: 1-21. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00054-8)
- Phillips SJ, RP Anderson, RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling* 190: 231-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips SJ, M Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
- R Development Core Team. 2008. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <http://www.r-project.org>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MX). 2015. Estudio de cuenca de abasto para el desarrollo industrial forestal maderable de la región Sierra Juárez, Oaxaca. Oaxaca de Juárez, México. 188 p.
- Smith DR, MG Sánchez, AA Ojeda. 2012. A New Species of *Zadiprion* (Hymenoptera: Diprionidae) on *Pinus duranguensis* from Chihuahua, México, and a review of other species of the genus. *Proceedings of the Entomological Society of Washington* 114(2): 224-237. DOI: <https://doi.org/10.4289/0013-8797.114.2.224>
- Soberón J, M Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *PNAS* 106(2): 19644-19650. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0901637106>
- Suárez-Mota ME, MM Pacheco-García, OP Cristóbal-Angulo, P Antúnez, W Santiago-García, I Bautista-Juárez. 2018. La plaga defoliadora *Zadiprion howdeni* Smith en la Sierra Norte de Oaxaca, México: estado actual y perspectivas. *Agroproductividad* 11(7): 35-41. Consultado 9 feb. 2021. Disponible en: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/913/1456>

Recibido: 10.09.21
Aceptado: 05.10.22