

Risk of infestations by *Dendroctonus mexicanus* Hopkins and *Dendroctonus frontalis* Zimmermann bark beetles in forests of Michoacán

Riesgo de infestaciones por los descortezadores *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann en bosques de Michoacán

Sigifredo Martínez-Rincón¹; José R. Valdez-Lazalde^{1*}; Héctor M. de los Santos-Posadas¹; Guillermo Sánchez-Martínez²

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales. Carretera México Texcoco km 36.5. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5. C. P. 20670. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.

*Corresponding author: valdez@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1482.

Abstract

Introduction: Severe *Dendroctonus* spp. infestations are reported in North and Central America. *Dendroctonus mexicanus* Hopkins and *Dendroctonus frontalis* Zimmermann are recognized as forest pests and are common in the state of Michoacán, Mexico.

Objective: To model current and future (2015-2039) spatial distribution of risk *D. mexicanus* and *D. frontalis* infestation in forests of Michoacán, Mexico.

Materials and methods: Multicriteria evaluation techniques, including the analytic hierarchy process and fuzzy membership functions, were combined with climate and biophysical variables to obtain forest infestation risk maps for *D. mexicanus* and *D. frontalis* under current and future climate scenarios.

Results and discussion: Climate, fire, tree density and topography were identified as relevant criteria influencing bark beetle outbreaks. The maximum risk value estimated for *D. mexicanus* was 0.78 and 0.83 for the current and future scenarios, respectively; for *D. frontalis* these values correspond to 0.84 and 0.85, respectively. In terms of area, high risk of infestation by *D. mexicanus* increased from 3.9 % (current scenario) to 5.0 % (future scenario); for *D. frontalis* it decreased from 10.8 % to 9.6 %. The very high-risk value remained constant (0.35 %) for both species and scenarios.

Conclusions: Forests of the Transversal Volcanic Belt (in the northeastern part of Michoacán) have the highest risk of bark beetle infestation in the two modeled scenarios.

Resumen

Introducción: En Norteamérica y Centroamérica se reportan infestaciones fuertes por *Dendroctonus* spp. En México, *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann son reconocidos como plagas forestales y son comunes en el estado de Michoacán.

Objetivo: Modelar la distribución espacial actual y futura (2015-2039) del riesgo de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques del estado de Michoacán, México.

Materiales y métodos: Se conjuntaron técnicas de evaluación multicriterio, incluyendo el proceso de análisis jerárquico y funciones de membresía borrosa, con variables climáticas y biofísicas para obtener mapas del riesgo de infestación de bosques por *D. mexicanus* y *D. frontalis* bajo los escenarios climáticos actual y futuro.

Resultados y discusión: El clima, incendio, densidad arbórea y topografía se identificaron como criterios relevantes que inciden en los brotes de descortezadores. El valor máximo de riesgo estimado para *D. mexicanus* fue 0.78 y 0.83 para el escenario actual y futuro, respectivamente; para *D. frontalis* estos valores corresponden a 0.84 y 0.85, respectivamente. En términos de superficie, el riesgo alto de infestación por *D. mexicanus* incrementó de 3.9 % (escenario actual) a 5.0 % (futuro); para *D. frontalis* disminuyó de 10.8 % a 9.6 %. El valor de riesgo muy alto permaneció constante (0.35 %) para ambas especies y escenarios.

Conclusiones: En los dos escenarios modelados, los bosques de la Faja Volcánica Transversal (en la parte noreste de Michoacán) presentan el mayor riesgo de infestación por descortezadores.

Keywords: Climate change; spatial modeling; conifer insects; forest pest; Analytic Hierarchy Process.

Palabras clave: Cambio climático; modelación espacial; insectos de coníferas; plaga forestal; proceso de análisis jerárquico.

Introduction

Conifer bark beetle insects generate changes in forest ecosystems when they reach epidemic levels leading to massive tree death (Krist, Sapio, & Tracz, 2007; Morris et al., 2018). Under such conditions, insects affect wood supply and ecosystem services for human well-being (Dhar, Parrott, & Heckbert, 2018).

In Western United States and Canada, infestations by *Dendroctonus ponderosae* Hopkins were recorded for more than a decade on about 28 million hectares (Dhar et al., 2018; United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service, 2018). In Mexico, conifer bark beetle insects (*Dendroctonus* spp. Erichson, Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) are considered the most damaging forest pest because they cause tree death (Soto-Correa, Avilés-Carrillo, Giron-Gutiérrez, & Cambrón-Sandoval, 2019). Nevertheless, these insects are considered biotic regulators of forests, as they play important roles in forest stand regeneration (Dhar et al., 2018; Raffa, Grégoire, & Lindgren, 2015) and in determining its structure and composition (Raffa et al., 2008).

Dendroctonus spp. populations are favored by low precipitation (Chapman, Veblen, & Schoennagel, 2012) and high temperatures (Raffa et al., 2015; Soto-Correa et al., 2019), as well as by occurrence of forest fires (Billings et al., 2004; Fonseca, Llanderal, Cibrián, Equihua, & de los Santos, 2009). On the other hand, large, homogeneous and mature stands are also more susceptible to insect attack (Raffa et al., 2015).

Seidl et al. (2017) believe that, in the future, forests will be at greater risk and frequency of disturbance due to climate change, with the possibility of increases in bark beetle insect populations beyond their historical range of spatial variability (Bentz et al., 2019). Therefore, early detection of forest areas susceptible to bark beetle insect attack would benefit mitigation of effects of these potential infestations (Bone, Wulder, White, Robertson, & Nelson, 2013).

Recently, temperate forests in Michoacán have been attacked by *Dendroctonus mexicanus* Hopkins and *Dendroctonus frontalis* Zimmermann bark beetle insects (Rubin-Aguirre et al., 2015; Salinas-Moreno et al., 2004). About 58 191 m³ of wood were affected in 2017, which represented 14.78 % of the total pine wood production in the state.

The objective of this research was to model the potential spatial distribution under current climatic conditions and an assumed scenario (2015-2039) of climate change and thus generate a tool that can

Introducción

Los insectos descortezadores de coníferas generan cambios en los ecosistemas forestales cuando alcanzan niveles epidémicos y causan la muerte masiva de árboles (Krist, Sapio, & Tracz, 2007; Morris et al., 2018). En tales condiciones, los insectos afectan el abastecimiento de madera y los servicios ecosistémicos para el bienestar del ser humano (Dhar, Parrott, & Heckbert, 2018).

En el oeste de Estados Unidos y Canadá se registraron, durante más de una década, infestaciones por *Dendroctonus ponderosae* Hopkins en alrededor de 28 millones de hectáreas (Dhar et al., 2018; United States Department of Agriculture [USDA] Forest Service, 2018). En México, los insectos descortezadores de coníferas (*Dendroctonus* spp. Erichson, Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) son considerados la plaga más perjudicial de los bosques, debido a que ocasionan la muerte de los árboles (Soto-Correa, Avilés-Carrillo, Giron-Gutiérrez, & Cambrón-Sandoval, 2019). No obstante, estos insectos son considerados reguladores bióticos de los bosques, ya que desempeñan roles importantes en la regeneración de la masa forestal (Dhar et al., 2018; Raffa, Grégoire, & Lindgren, 2015) y en la determinación de su estructura y composición (Raffa et al., 2008).

Las poblaciones de *Dendroctonus* spp. son favorecidas por precipitaciones bajas (Chapman, Veblen, & Schoennagel, 2012) y temperaturas altas (Raffa et al., 2015; Soto-Correa et al., 2019), así como por la ocurrencia de incendios forestales (Billings et al., 2004; Fonseca, Llanderal, Cibrián, Equihua, & de los Santos, 2009). Por otra parte, los rodales grandes, homogéneos y maduros también son más susceptibles al ataque de estos insectos (Raffa et al., 2015).

Seidl et al. (2017) consideran que, en el futuro, los bosques tendrán mayor riesgo y frecuencia de perturbación debido al cambio climático, existiendo la posibilidad de incrementos de las poblaciones de insectos descortezadores más allá de su rango histórico de variabilidad espacial (Bentz et al., 2019). Por lo anterior, la detección anticipada de áreas forestales susceptibles de ataque por insectos descortezadores beneficiaría la mitigación de los efectos de estas posibles infestaciones (Bone, Wulder, White, Robertson, & Nelson, 2013).

Recientemente, los bosques templados del estado de Michoacán han sido atacados por insectos descortezadores *Dendroctonus mexicanus* Hopkins y *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Rubin-Aguirre et al., 2015; Salinas-Moreno et al., 2004). En el 2017 se afectaron alrededor de 58 191 m³ de madera, que

be used to determine probability of epidemic outbreaks of *D. mexicanus* and *D. frontalis* in temperate forests of Michoacán.

Materials and Methods

Study area

The study area comprises temperate coniferous forests of Michoacán, Mexico, covering approximately 1 124 973 ha (Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM], 2015). These forests are part of the physiographic provinces Trans-Mexican Volcanic Belt (TVB) and Sierra Madre del Sur (SMS). The region has temperate climates, with mean annual temperatures ranging from 8 to 30 °C, and annual precipitation from 400 to 2 000 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018). The altitude varies from 104 to 3 641 m (INEGI, 2019).

Selection and analysis of variables associated with bark beetle outbreaks

Within the framework of the analytic hierarchy process (AHP; Saaty, 1980), criteria (variables) were organized, analyzed and combined to estimate the risk of bark beetle outbreaks. The AHP comprises three phases (Malczewski, 1999): 1) construction of a hierarchy problem based on relevant criteria and sub-criteria, 2) analyzing criteria and sub-criteria (variables) by experts in the field, and 3) estimation of a consistency value associated with analyzing criteria and sub-criteria to ensure that weights assigned are not the product of chance, but of a rational and correct analysis.

Phase 1

Relevant criteria and sub-criteria for the outbreak of *D. frontalis* and *D. mexicanus* were identified and defined based on a literature review and consultation with seven Mexican forest pest experts (Malczewski, 1999). The literature review provided information on geographic distribution (Salinas-Moreno et al., 2010), physiographic characteristics (Salinas-Moreno et al., 2004; Armendáriz-Toledano, Zuñiga, García-Roman, Valerio-Mendoza, & García-Navarrete, 2018), climate conditions (Morales-Rangel, Cambrón-Sandoval, Soto-Correa, Jones, & Obregón-Zuñiga, 2018; Raffa et al., 2015) and tree-size measurements of the sites where bark beetle outbreaks occur (Krist et al., 2007; Negrón, Anhold, & Munson, 2001; Raffa et al., 2015). The criteria identified as relevant were climate, occurrence of wildfire, stand tree density (basal area), and topography. The sub-criteria total annual precipitation, mean annual temperature, exposure, altitude and slope were identified. The hierarchy problem (Figure 1) was constructed from these criteria and sub-criteria (Malczewski, 1999).

representó 14.78 % de la producción total de madera de pino del estado.

Esta investigación tuvo como objetivo modelar la distribución espacial potencial bajo las condiciones climáticas actuales y un escenario supuesto (2015-2039) de cambio climático y así generar una herramienta que pueda emplearse para conocer la probabilidad de ocurrencia de brotes epidémicos de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en los bosques templados del estado de Michoacán.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio comprende los bosques de coníferas de clima templado del estado de Michoacán, México, abarcando aproximadamente 1 124 973 ha (Comisión Forestal del Estado de Michoacán [COFOM], 2015). Estos bosques forman parte de las provincias fisiográficas Faja Volcánica Transversal (FVT) y Sierra Madre del Sur (SMS). La región cuenta con climas templados, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre 8 y 30 °C, y la precipitación anual varía de 400 a 2 000 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2018). La altitud varía de 104 a 3 641 m (INEGI, 2019).

Selección y análisis de variables asociadas con la aparición de brotes de insectos descortezadores

En el marco del proceso de análisis jerárquico (PAJ; Saaty, 1980) se organizaron, ponderaron y combinaron criterios (variables) para estimar el riesgo de brotes de descortezadores. El PAJ comprende tres fases (Malczewski, 1999): 1) construcción de una jerarquía del problema con base en criterios y subcriterios relevantes, 2) ponderación de los criterios y subcriterios (variables) por expertos en el tema y 3) estimación de un valor de consistencia asociado a la ponderación de criterios y subcriterios, para garantizar que las ponderaciones asignadas no son producto del azar, sino de un análisis juicioso y correcto.

Fase 1

Los criterios y subcriterios relevantes para la aparición de un brote de *D. frontalis* y *D. mexicanus* fueron identificados y definidos a partir de una revisión bibliográfica y la consulta a siete expertos mexicanos en el tema de plagas forestales (Malczewski, 1999). La revisión de literatura proporcionó información sobre la distribución geográfica (Salinas-Moreno et al., 2010), características fisiográficas (Salinas-Moreno et al., 2004; Armendáriz-Toledano, Zuñiga, García-Roman, Valerio-Mendoza, & García-Navarrete, 2018), climáticas (Morales-Rangel, Cambrón-Sandoval, Soto-

Phase 2

A total of seven surveys were completed by experts with knowledge on forest pests to provide, by means of paired comparison matrices, each criterion and sub-criterion identified as relevant. Respondents were instructed to use the 1 to 9 rating scale proposed by Saaty (1980), which specifies that by assigning a higher number to a factor/criterion, it represents more importance than another for the purpose being evaluated. The matrices were solved in the WEIGHT module of TerrSet® version 18.31 (Eastman, 2016) to calculate the importance value (weighting) of each criterion and sub-criterion.

Phase 3

The consistency ratio (CR) defined by Saaty (1980) was calculated to evaluate the weighting confidence. A CR < 0.10 indicates that consistency is acceptable. If CR > 0.10, inconsistency in the comparisons is assumed and should be corrected or discarded (Malczewski, 1999; Saaty, 1980). CR value for each survey was calculated in the WEIGHT module of TerrSet® version 18.31 (Eastman, 2016). Of the seven surveys conducted, only three that were consistent were considered and, from these, the arithmetic mean was calculated as the weighting value for each of the criteria and sub-criteria.

Correa, Jones, & Obregón-Zuñiga, 2018; Raffa et al., 2015) y condiciones dasométricas de los sitios donde ocurren brotes de insectos descortezadores (Krist et al., 2007; Negrón, Anhold, & Munson, 2001; Raffa et al., 2015). Los criterios identificados como relevantes fueron: clima, ocurrencia de incendio forestal, densidad arbórea del rodal (área basal) y topografía. Como parte de estos se identificaron los subcriterios precipitación total anual, temperatura media anual, exposición, altitud y pendiente. La jerarquía del problema (Figura 1) se construyó a partir de dichos criterios y subcriterios (Malczewski, 1999).

Fase 2

Se aplicaron siete encuestas a expertos con conocimientos en plagas forestales con el propósito de que ponderaran, mediante matrices de comparaciones pareadas, cada criterio y subcriterio identificado como relevante. A los encuestados se les indicó utilizar la escala de calificación de 1 a 9 propuesta por Saaty (1980), la cual especifica que al asignar un número mayor a un factor/criterio, este representa más importancia que otro para el propósito que se evalúa. Las matrices fueron resueltas en el módulo WEIGHT del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016) para calcular el valor de importancia (ponderación) de cada criterio y subcriterio.

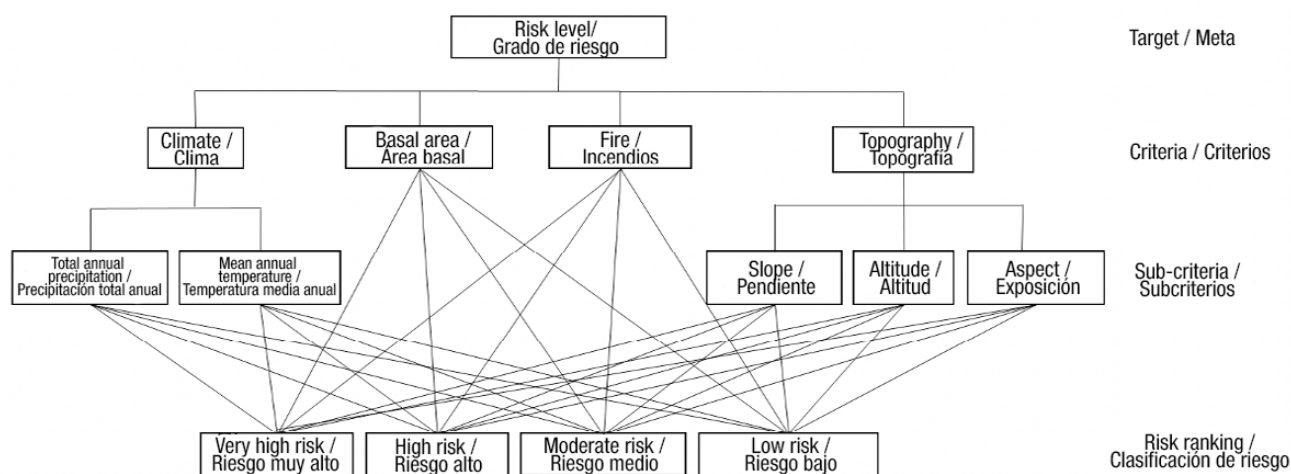


Figure 1. Hierarchy of criteria and sub-criteria for estimating risk of infestation by *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis* in temperate forests of Michoacán, Mexico.

Figura 1. Jerarquía de los criterios y subcriterios para la estimación del riesgo de infestación por *Dendroctonus mexicanus* y *D. frontalis* en bosques templados de Michoacán, México.

These values were incorporated as multiplicative vectors in the multi-criteria evaluation process to estimate risk of outbreak.

Spatial databases

Previously generated maps of total annual precipitation and mean annual temperature ($\sim 1 \text{ km}^2$ spatial resolution) were used for the current scenario (Cuervo-Robayo et al., 2014) and a future scenario (Fernández, Zavala, Romero, Conde, & Trejo, 2015). The maps for the current scenario were constructed with average monthly climate data for the period 1910-2009. Those corresponding to the future scenario, called representative concentration trajectory (RCP 4.5) with near horizon 2015-2039, resulted from modeling a low greenhouse gas concentration trajectory (580-650 ppm CO_2eq) that could be reached by the year 2100 and in which temperature changes of approximately 2.3 to 2.6 °C may occur. The RCP 4.5 scenario is one of the four greenhouse gas concentration trajectories adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014) in climate change scenarios and which has more coincidence with cumulative emissions in the short term (Hausfather & Peters, 2020). On the other hand, geo-referenced data of forest fires recorded by the Comisión Nacional Forestal and the Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (CONAFOR & SNIGF, 2020) were obtained for the period 2010 to 2019.

Tree density criterion was represented by a basal area map ($\text{m}^2\text{-ha}^{-1}$), based on data from the Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (CONAFOR & SNIGF, 2020b). The existing basal area at INFyS sites was determined with ratio-mean estimators (Šmelko & Merganič, 2008); subsequently, basal area was mapped over the entire area comprising the state's coniferous forests using the weighted inverse distance interpolation method (Chirinos & Mallqui, 2016). Finally, slope, aspect and altitude maps were generated using the digital elevation model with 30 m spatial resolution (INEGI, 2019). Maps were constructed in ArcGis® 10.5, homogenizing pixel size to 30 m, and cartographic projection to geographic coordinate system and the North American Datum of 1927 (NAD 27).

Standardization of sub-criteria

Criteria and sub-criteria identified as relevant for bark beetle infestation are recorded in different units of measurement, so it was necessary to standardize them to a common unit, i.e., to values on a scale from 0 to 1 (Gómez & Barredo, 2005). For this purpose, fuzzy membership functions were used (Malczewski, 1999). First, inflection points of the functions were defined (Table 1), which were used as a basis for defining the degree of membership (suitability) of each pixel that makes up the study area. The degree of membership

Fase 3

La razón de consistencia (RC) definida por Saaty (1980) se calculó para evaluar la fiabilidad de las ponderaciones. Una $RC < 0.10$ indica que la consistencia es aceptable. Si la $RC > 0.10$ se presume inconsistencia en las comparaciones, mismas que deben corregirse o desecharse (Malczewski, 1999; Saaty, 1980). El valor de RC para cada encuesta se calculó en el módulo WEIGHT del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016). De las siete encuestas realizadas se consideraron solo tres que resultaron consistentes y, a partir de estas, se calculó la media aritmética como valor de ponderación para cada uno de los criterios y subcriterios. Esos valores se incorporaron como vectores multiplicativos al proceso de evaluación multicriterio para estimar el riesgo de brote.

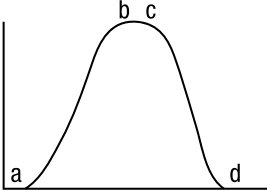
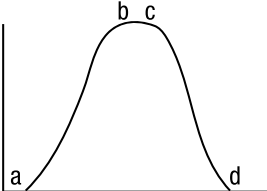
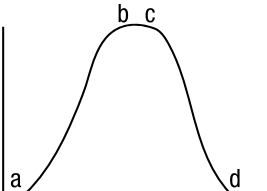
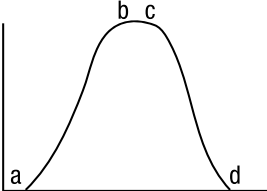
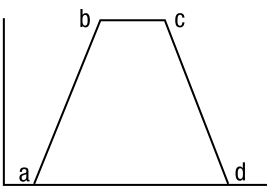
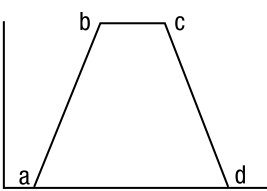
Bases de datos espaciales

Se utilizaron mapas de la precipitación total anual y de la temperatura media anual ($\sim 1 \text{ km}^2$ de resolución espacial), generados previamente, para el escenario actual (Cuervo-Robayo et al., 2014) y un escenario futuro (Fernández, Zavala, Romero, Conde, & Trejo, 2015). Los mapas del escenario actual fueron construidos con datos climáticos mensuales promedio del periodo 1910-2009. Los correspondientes al escenario futuro, denominado trayectoria de concentración representativa (RCP 4.5) con horizonte cercano 2015-2039, resultaron de la modelación de una trayectoria de concentración baja de gases de efecto invernadero (580-650 ppm CO_2eq) que podría alcanzarse para el año 2100 y en el que pueden presentarse cambios de temperatura aproximados de 2.3 a 2.6 °C. El escenario RCP 4.5 es una de las cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero adoptadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014) en los escenarios de cambio climático y que tiene más coincidencia con las emisiones acumuladas a corto plazo (Hausfather & Peters, 2020). Por otro lado, se obtuvieron datos georreferenciados de incendios forestales registrados por la Comisión Nacional Forestal y el Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (CONAFOR & SNIGF, 2020) para el periodo 2010 a 2019.

El criterio densidad arbórea se representó mediante un mapa de área basal ($\text{m}^2\text{-ha}^{-1}$), a partir de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (CONAFOR & SNIGF, 2020b). Inicialmente, el área basal existente en los sitios del INFyS se determinó con estimadores de medias de razón (Šmelko & Merganič, 2008); posteriormente, el área basal se mapeó en la totalidad del área que comprenden los bosques de coníferas del estado mediante el método de interpolación de la distancia inversa ponderada (Chirinos & Mallqui, 2016). Finalmente, se generaron

Table 1. Fuzzy membership functions defined to standardize sub-criteria for *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis*. Y-axis indicates the fitness level for a specific sub-criterion in the interval from 0 to 1 and X-axis indicates the original values of the sub-criterion, e.g., total annual precipitation in mm.

Cuadro 1. Funciones de membresía borrosa definidas para estandarizar los subcriterios de *Dendroctonus mexicanus* y *D. frontalis*. El eje “y” indica el nivel de aptitud para un subcriterio específico en el intervalo de 0 a 1 y el eje “x” indica los valores originales del subcriterio, v.g. precipitación total anual en mm.

Factor/Factor	Membership function/ Función de membresía	Inflection points used on x-axis/ Puntos de inflexión usados en el eje x
Total annual precipitation (mm)/ Precipitación total anual (mm)		a: 500, b: 550, c: 700, d: 1 200 <i>D. mexicanus</i> a: 700, b: 750, c: 900, d: 1 100 <i>D. frontalis</i>
Mean annual temperature (°C)/ Temperatura media anual (°C)		a: 5, b: 18, c: 22, d: 26 <i>D. mexicanus</i> a: 12, b: 20, c: 26, d: 30 <i>D. frontalis</i>
Basal area (m ² ·ha ⁻¹)/ Área basal (m ² ·ha ⁻¹)		a: 12, b: 15, c: 20, d: 28 <i>D. mexicanus</i> a: 12, b: 15, c: 20, d: 28 <i>D. frontalis</i>
Altitude (m)/ Altitud (m)		a: 900, b: 2 300, c: 2 500, d: 3 300 <i>D. mexicanus</i> a: 800, b: 1 600, c: 2 000, d: 3 000 <i>D. frontalis</i>
Slope (°)/ Pendiente (°)		a: 0, b: 0.5, c: 2, d: 4 <i>D. mexicanus</i> a: 0, b: 0.5, c: 2, d: 3 <i>D. frontalis</i>
Aspect (°)/ Exposición (°)		a: 90, b: 135, c: 225, d: 270 <i>D. mexicanus</i> a: 90, b: 135, c: 225, d: 270 <i>D. frontalis</i>

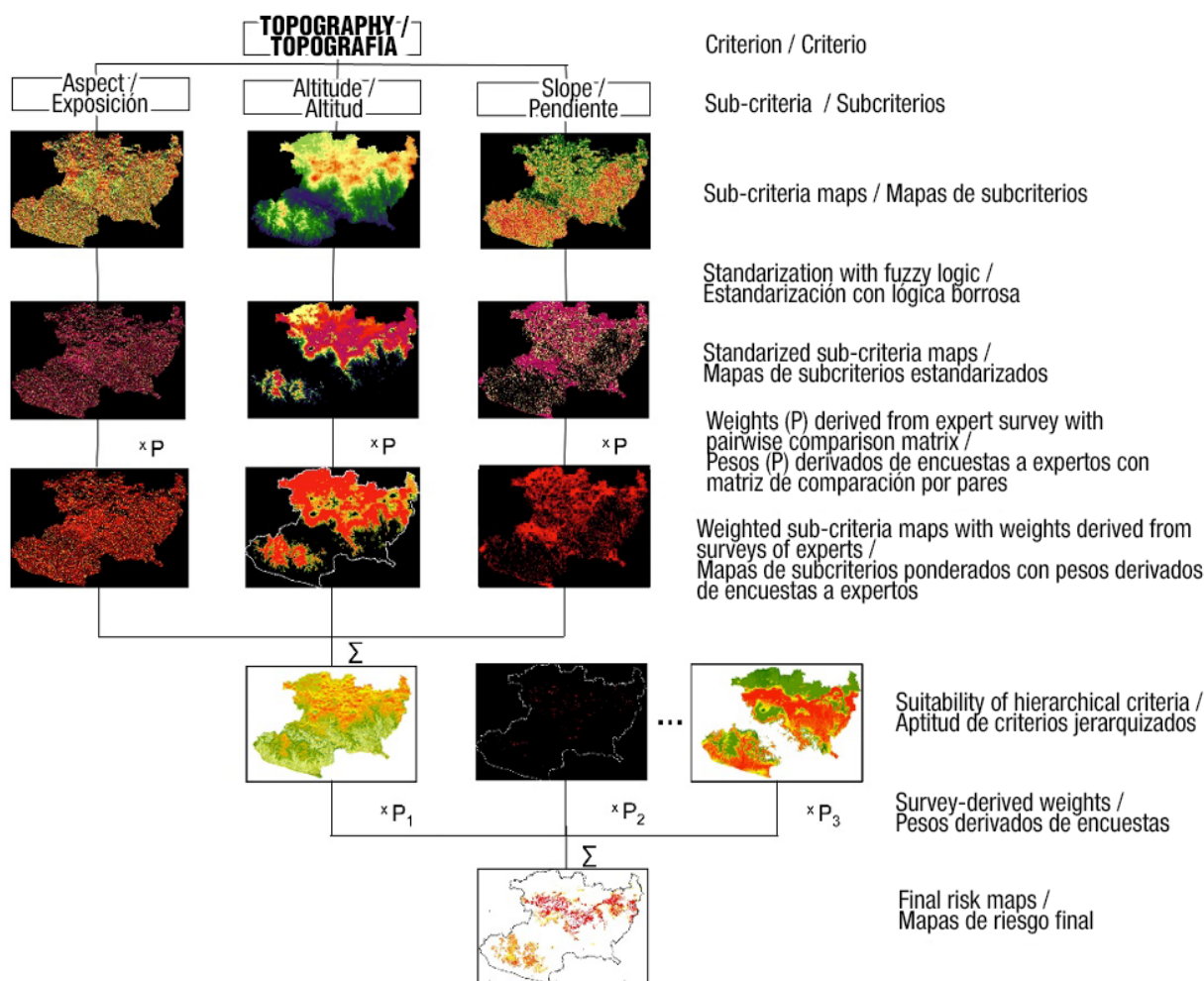


Figure 2. Analytic Hierarchy Process for estimating the risk of *Dendroctonus sp.* infestation in Michoacán, Mexico.

Figura 2. Proceso de análisis jerárquico para la estimación del riesgo de brote de *Dendroctonus sp.* en el estado de Michoacán, México.

is higher when the standardized value is close to one and lower when it is close to zero. Membership functions can have varied shapes, the most common are linear, sigmoidal and “J” shaped with increasing, decreasing or symmetric direction (Eastman, 2016). The “fire” criterion was standardized using binary values (0 or 1), because information regarding the degree of intensity was not available. Areas with and without fire presence were classified with value equal to one and zero, respectively. Standardized values of the sub-criteria were generated in the Fuzzy module of TerrSet® version 18.31 (Eastman, 2016).

Risk estimation for current infestation and under a climate change scenario

The risk of outbreak for both species of bark beetles was estimated considering four criteria and five sub-criteria (Figure 1). After sub-criteria were standardized using membership functions (Table 1), they were weighted by multiplying by the weight assigned by the experts (Figure 2). Subsequently, the weighted sub-

mapas de pendiente, exposición y altitud a partir del modelo digital de elevación con resolución espacial de 30 m (INEGI, 2019). Los mapas se construyeron en el programa ArcGis® 10.5, homogeneizando el tamaño de píxel a 30 m, y la proyección cartográfica al sistema de coordenadas geográfico y el Datum Norteamericano de 1927 (NAD 27).

Estandarización de subcriterios

Los criterios y subcriterios identificados como relevantes para que se presente un brote por descortezadores se registran en unidades diferentes de medida, por ello fue necesario estandarizarlos a una unidad común, *i. e.* a valores en escala del 0 al 1 (Gómez & Barredo, 2005). Para este propósito se utilizaron funciones de membresía borrosa (Malczewski, 1999). En primera instancia se definieron los puntos de inflexión de las funciones (Cuadro 1) que sirvieron como base para definir el grado de pertenencia (aptitud) de cada píxel que conforma el área de estudio. El grado de pertenencia es mayor cuando el valor estandarizado se

criteria maps were summed to give rise to criterion maps. Using a similar procedure, the weighted criterion maps were generated and multiplied by the weight assigned by the experts. Finally, criterion maps were summed to create the map that estimates the risk of bark beetle outbreak at the pixel level (Figure 2). For easier interpretation, the calculated values were grouped into four risk classes: low (0-0.2), medium (0.2-0.4), high (0.4-0.6), very high (>0.6).

The procedure to generate the future risk map was similar to that explained in the previous paragraph to estimate the risk of infestation by *Dendroctonus* under current conditions; the only difference was to replace the climate criterion maps (sub-criteria total annual precipitation and mean annual temperature) with maps that record the projection of these sub-criteria considering the climate change scenario RCP 4.5. This shows, in general, increase in temperature and decrease in precipitation (Fernandez et al., 2015). The rest of the criteria remained constant.

The risk map generated for each bark beetle species was compared with the geographic coordinates recorded for bark beetle outbreaks in the period 2010 to 2019.

Comparison of current and future spatial distribution of infestation risk

Infestation risk maps for the current scenario and the future scenario (climate change) were compared using the CrossTab module of TerrSet® version 18.31 (Eastman, 2016). This module generated a cross-classification matrix that identified changes in estimated infestation risk values for the two modeled scenarios: gains, losses, permanence, and total change in hectares, for each of the infestation risk categories defined for the two *Dendroctonus* species (Martínez, Martín, & Román, 2000). In addition, CrossTab provided the Kappa index, a quantitative measure of agreement between the compared maps (Eastman, 2016). This index takes values from -1 to 1; values close to 1 indicate strong agreement between maps, on the contrary, values close to -1 indicate low agreement (Martínez et al., 2000).

Results and Discussion

Criteria and sub-criteria identified for bark beetle infestation

Four relevant criteria were identified that influence infestation of *D. mexicanus* y *D. frontalis*. The order of importance is as follows: climate, fire, tree density and topography (Table 2). At the sub-criteria level, total annual precipitation, mean annual temperature, aspect, altitude and slope emerged as relevant.

aproxima a uno y es menor cuando está cerca de cero. Las funciones de membresía pueden tener formas muy variadas, siendo las más comunes las de forma lineal, sigmoideal y en forma de "J" con dirección creciente, decreciente o simétrica (Eastman, 2016). El criterio "incendio" se estandarizó utilizando valores binarios (0 o 1), debido a que no se dispuso de información referente al grado de intensidad. Las áreas con y sin presencia de incendio se clasificaron con valor igual a uno y cero, respectivamente. Los valores estandarizados de los subcriterios se generaron en el módulo Fuzzy del software TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016).

Estimación del riesgo de infestación actual y bajo un escenario de cambio climático

El riesgo de brote para ambas especies de descortezadores se estimó considerando cuatro criterios y cinco subcriterios (Figura 1). Después de que los subcriterios se estandarizaron mediante las funciones de membresía (Cuadro 1), se ponderaron al multiplicar por el peso asignado por los expertos (Figura 2). Posteriormente, los mapas subcriterio ponderados se sumaron para dar origen a mapas criterio. Mediante un procedimiento similar se generaron los mapas criterio ponderados y se multiplicaron por el peso que los expertos asignaron. Finalmente, los mapas criterio se sumaron para crear el mapa que estima el riesgo de brote de insectos descortezadores a nivel píxel (Figura 2). Para facilitar la interpretación, los valores calculados se agruparon en cuatro clases de riesgo: bajo (0-0.2), medio (0.2-0.4), alto (0.4-0.6) y muy alto (>0.6).

El procedimiento para generar el mapa de riesgo a futuro fue similar al explicado en el párrafo anterior para estimar el riesgo de infestación por *Dendroctonus* bajo las condiciones actuales; la única diferencia consistió en sustituir los mapas criterio de clima (subcriterios precipitación total anual y temperatura media anual) por mapas que registran la proyección de esos subcriterios considerando el escenario de cambio climático RCP 4.5. Este vislumbra, en general, aumento en la temperatura y disminución en la precipitación (Fernández et al., 2015). El resto de los criterios permanecieron igual.

El mapa de riesgo generado para cada especie de descortezador se comparó con las coordenadas geográficas registradas para brotes de descortezadores ocurridos en el periodo 2010 a 2019.

Comparación de la distribución espacial actual y futura del riesgo de infestación

Los mapas de riesgo de infestación para el escenario actual y el escenario futuro (cambio climático) se compararon utilizando el módulo CrossTab del software

Table 2. Analysis of criteria and sub-criteria for estimating the risk of outbreaks of *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis* according to Mexican forest pest experts.

Cuadro 2. Ponderación de criterios y subcriterios para la estimación del riesgo de brotes de *Dendroctonus mexicanus* y *D. frontalis* de acuerdo con expertos mexicanos en plagas forestales.

Criteria/ Criterios	Weight/ Peso	Sub-criteria climate/ Subcriterios clima	Weight/ Peso	Sub-criteria topography/ Subcriterios topografía	Weight/ Peso
Climate/ Clima	0.45	Total annual precipitation / Precipitación total anual	0.86	Aspect /Exposición	0.46
Fire/ Incendio	0.26	Mean annual temperature / Temperatura media anual	0.14	Altitude /Altitud	0.39
Tree density / Densidad arbórea	0.14			Slope /Pendiente	0.15
Topography/ Topografía	0.15				

Primary literature on bark beetles supports our finding on weighting climate as the main criterion affecting the outbreaks of these insects. According to Chapman et al. (2012) and Raffa et al. (2015), increased temperature and decreased precipitation favor the growth of insect populations. On the other hand, Raffa et al. (2008, 2015) mention that prolonged droughts lead to tree stress, causing them to weaken and become less resistant to bark beetle attack. Morales-Rangel et al. (2018) found that a mean annual temperature between 16 and 18 °C favors growth of *D. frontalis* and *D. mexicanus*, while Moser, Fitzgibbon, and Klepzig (2005) report that mean temperatures below 16 °C decreased the presence of both insects. González-Hernández, Morales-Villafañá, Romero-Sánchez, Islas-Trejo, and Pérez-Miranda (2018) indicate mean annual temperatures from 12 to 18 °C and precipitation in the range of 600 to 1 200 mm increase *D. mexicanus* growth.

Referring to fire analysis, according to Fonseca et al. (2009), trees subjected to fire action release volatile compounds that serve as attractants for some bark beetle insects. On the other hand, Billings et al. (2004) reported that fire weakens trees, causing them to produce less resin and have less defense against *Dendroctonus* attack.

Regarding the importance of a forest's structure, Raffa et al. (2008, 2015) note that tree density influences bark beetle outbreaks. Morris et al. (2018) discuss that stands with high tree density are more susceptible to infestation due to competition for resources. This agrees with that reported by Negrón et al. (2001), who found more attacks by *Dendroctonus pseudotsugae* Hopkins in stands of *Pseudotsugae menziesii* (Mirb.) Franco with basal area of more than 26.4 m²·ha⁻¹ and with greater intensity in those exceeding 39 m²·ha⁻¹.

TerrSet® versión 18.31 (Eastman, 2016). Este módulo generó una matriz de clasificación cruzada que permitió la identificación de los cambios en los valores estimados de riesgo de infestación para los dos escenarios modelados: ganancias, pérdidas, permanencias y cambio total en hectáreas, para cada una de las categorías de riesgo de infestación definidas para las dos especies de *Dendroctonus* (Martínez, Martín, & Román, 2000). Adicionalmente, CrossTab proporcionó el índice Kappa, una medida cuantitativa de la concordancia entre los mapas comparados (Eastman, 2016). Este índice toma valores de -1 a 1; valores cercanos a 1 indican concordancia fuerte entre mapas, contrariamente, valores cercanos a -1 indican concordancia baja (Martínez et al., 2000).

Resultados y discusión

Criterios y subcriterios identificados para la ocurrencia de infestación de insectos descortezadores

Se identificaron cuatro criterios relevantes que inciden en la ocurrencia de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis*. En orden de importancia son: clima, incendio, densidad arbórea y topografía (Cuadro 2). A nivel de subcriterio, la precipitación total anual, temperatura media anual, exposición, altitud y pendiente surgieron como relevantes.

La literatura primaria sobre descortezadores sustenta la ponderación encontrada del clima como criterio principal que incide en los brotes de estos insectos. Según Chapman et al. (2012) y Raffa et al. (2015), el aumento de la temperatura y la disminución en la precipitación favorecen el crecimiento de las poblaciones de insectos. Por otro lado, Raffa et al. (2008, 2015) mencionan que las sequías prolongadas

Regarding topography, according to Krist et al. (2007), this variable plays an important role in tree mortality risk. According to Bennie, Huntley, Wiltshire, Hill, and Baxter (2008), slope and aspect influence solar radiation received by trees, affecting evapotranspiration and available soil moisture, mainly those on slopes with southern aspect. As a consequence, these trees suffer greater stress and are more exposed to bark beetle outbreak. Cuéllar-Rodríguez, Equihua-Martínez, Villa-Castillo, Estrada-Venegas, and Romero-Nápoles (2013) reported infestations of *D. mexicanus* in *Pinus cembroides* Zucc. forests established at altitudes ranging from 1 820 to 2 700 m and different aspects, including the southwest. Salinas-Moreno et al. (2004) mention a preferred altitudinal range between 2 100 and 2 500 m for this insect. Armendáriz-Toledano et al. (2018) and Salinas-Moreno et al. (2004) reported higher abundance of *D. frontalis* in altitudinal interval between 1 500 and 2 000 m.

Risk of infestation by *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis*

Two risk maps were generated by insect species, one for the current scenario (1910-2009) and the other for the future scenario (2015-2039) (Figures 3 and 4). The maximum estimated infestation risk value for *D. mexicanus* was 0.78 for the current scenario and 0.83 for the future scenario. Maximum values of 0.84 and 0.85 were estimated for *D. frontalis* for the current and future scenarios, respectively. For both species, the areas of highest risk are located along the TVB, which coincides with that reported by Salinas-Moreno et al. (2010) and Armendáriz-Toledano et al. (2018), who indicated that the most favorable climatic conditions for bark beetles under analysis are located above the TVB. Mapped infestation risk is also consistent with reports of outbreak recorded in the period 2010 to 2019 by CONAFOR (Figures 3 and 4); 2 255 records were reported for *D. mexicanus* and 99 for *D. frontalis*.

According to Armendáriz-Toledano et al. (2018), in the SMS there are also ideal climatic conditions for both species of bark beetle to growth; however, the results show that the risk of an outbreak in this area is lower than that estimated for the TVB. In another study, Salinas-Moreno, Ager, Vargas, Hayes, and Zúñiga (2010) reported that the most common pine species in the TVB and SMS are very similar, so it may be the case that *D. mexicanus* and *D. frontalis* are found in the same area, because they have similar host preferences and can attack and coexist in the same tree (Armendáriz-Toledano et al., 2018; Moser et al., 2005). Both *D. mexicanus* and *D. frontalis* are aggressive species that attack various pine species in the northern hemisphere depending on latitude; although in appearance they are generalist species, the main hosts of *D. frontalis* in Mexico are *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pringlei*

provocan estrés en los árboles, ocasionando que se debiliten y opongán menor resistencia al ataque de descortezadores. Morales-Rangel et al. (2018) encontraron que una temperatura media anual entre 16 y 18 °C favorece el desarrollo de *D. frontalis* y *D. mexicanus*, mientras que Moser, Fitzgibbon, y Klepzig (2005) reportan que temperaturas medias por debajo de 16 °C disminuyeron la presencia de ambos insectos. Por su parte, González-Hernández, Morales-Villafaña, Romero-Sánchez, Islas-Trejo, y Pérez-Miranda (2018) indican que temperaturas promedio anuales de 12 a 18 °C y la precipitación en un rango de 600 a 1 200 mm incrementan el desarrollo de *D. mexicanus*.

Referente a la ponderación de los incendios, de acuerdo con Fonseca et al. (2009), los árboles sometidos a la acción de un incendio liberan compuestos volátiles que sirven como atrayentes para algunos insectos descortezadores. Por otro lado, Billings et al. (2004) reportaron que la ocurrencia de incendios debilita los árboles, provocando que produzcan menos resina y tengan menor defensa ante un ataque de *Dendroctonus*.

Con respecto a la importancia de la estructura de un bosque, Raffa et al. (2008, 2015) señalan que la densidad arbórea influye en la aparición de brotes de insectos descortezadores. Morris et al. (2018) argumentan que los rodales con alta densidad arbórea son más susceptibles a infestarse, debido a la competencia por los recursos. Esto concuerda con lo reportado por Negrón et al. (2001), quienes encontraron más ataques de *Dendroctonus pseudotsugae* Hopkins en rodales de *Pseudotsugae menziesii* (Mirb.) Franco con área basal de más de 26.4 m²·ha⁻¹ y con mayor intensidad en aquellos que superaban los 39 m²·ha⁻¹.

En cuanto a la topografía, según Krist et al. (2007), esta variable juega un papel importante en el riesgo de mortalidad de los árboles. De acuerdo con Bennie, Huntley, Wiltshire, Hill, y Baxter (2008), la pendiente y la exposición influyen en la radiación solar que los árboles reciben, afectando la evapotranspiración y la humedad disponible en el suelo, principalmente los que se encuentran en laderas con exposición sur. Como consecuencia esos árboles sufren mayor estrés y están más propensos a un brote de descortezadores. Cuéllar-Rodríguez, Equihua-Martínez, Villa-Castillo, Estrada-Venegas, y Romero-Nápoles (2013) reportaron infestaciones de *D. mexicanus* en bosques de *Pinus cembroides* Zucc. establecidos en altitudes que oscilan de los 1 820 a 2 700 m y diferentes exposiciones, entre ellas la suroeste. Salinas-Moreno et al. (2004) mencionan un rango altitudinal preferente entre 2 100 y 2 500 m para este insecto. Armendáriz-Toledano et al. (2018) y Salinas-Moreno et al. (2004) reportaron mayor abundancia de *D. frontalis* en el intervalo altitudinal entre 1 500 y 2 000 m.

Shaw, *P. teocote* Schiede ex Schltdl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Chamisso, while for *D. mexicanus* they are *Pinus leiophylla*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus* Lindl., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb. and *P. oocarpa* (Salinas-Moreno et al., 2010).

Riesgo de infestación por *Dendroctonus mexicanus* y *D. frontalis*

Se generaron dos mapas de riesgo por especie de insecto, uno para el escenario actual (1910-2009) y otro

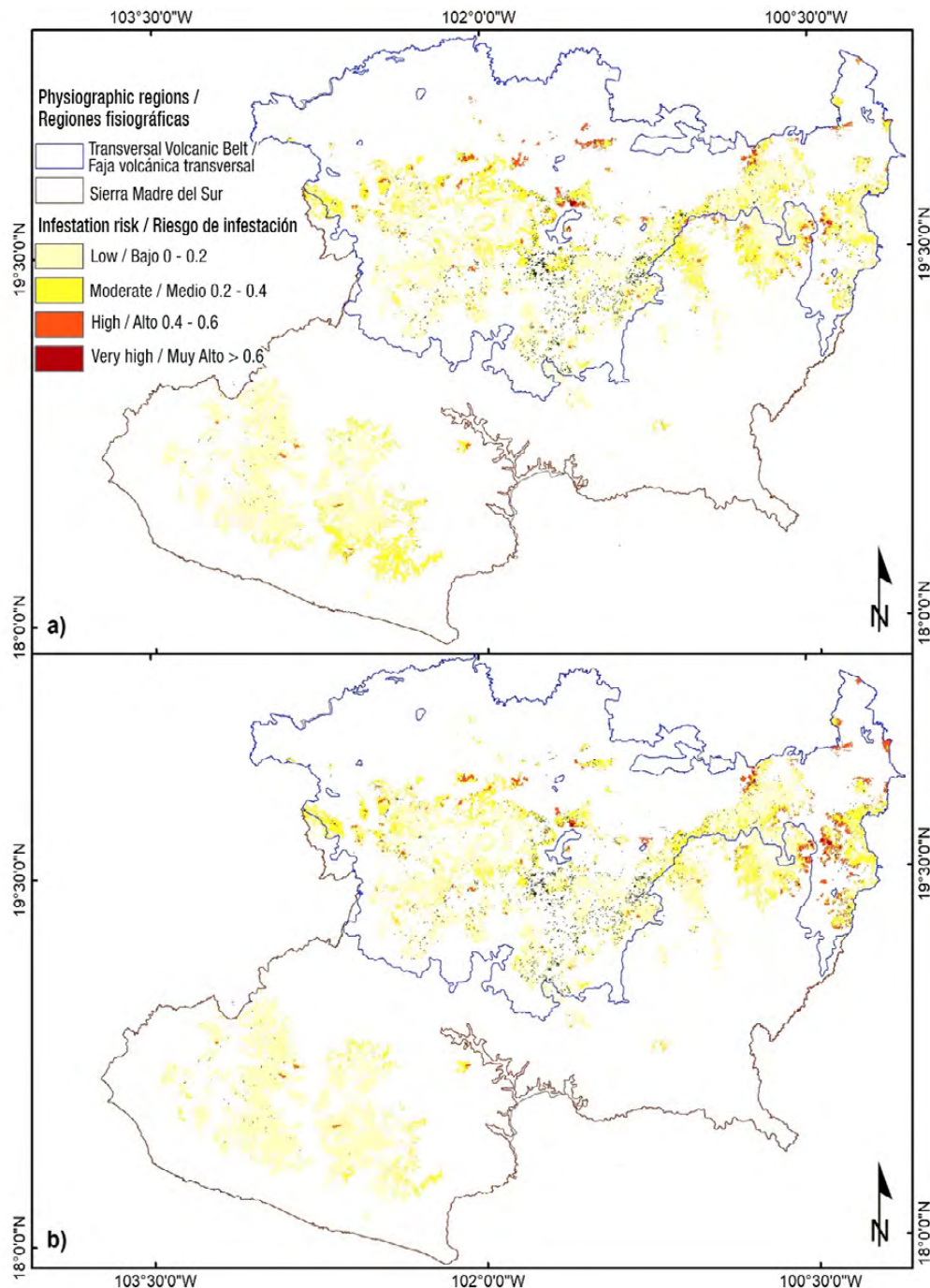


Figure 3. Risk of infestation by *Dendroctonus mexicanus* in temperate forests in the state of Michoacán, Mexico. a) period 1910-2009 and b) risk with representative concentration trajectory (RCP 4.5) of low greenhouse gas emissions with near future horizon 2015-2039. Black dots represent outbreaks of the insect reported by CONAFOR (2010-2019).

Figura 3. Riesgo de infestación por *Dendroctonus mexicanus* en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) periodo 1910-2009 y b) riesgo con trayectoria de concentración representativa (RCP 4.5) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039. Los puntos negros representan brotes del insecto reportados por la CONAFOR (2010-2019).

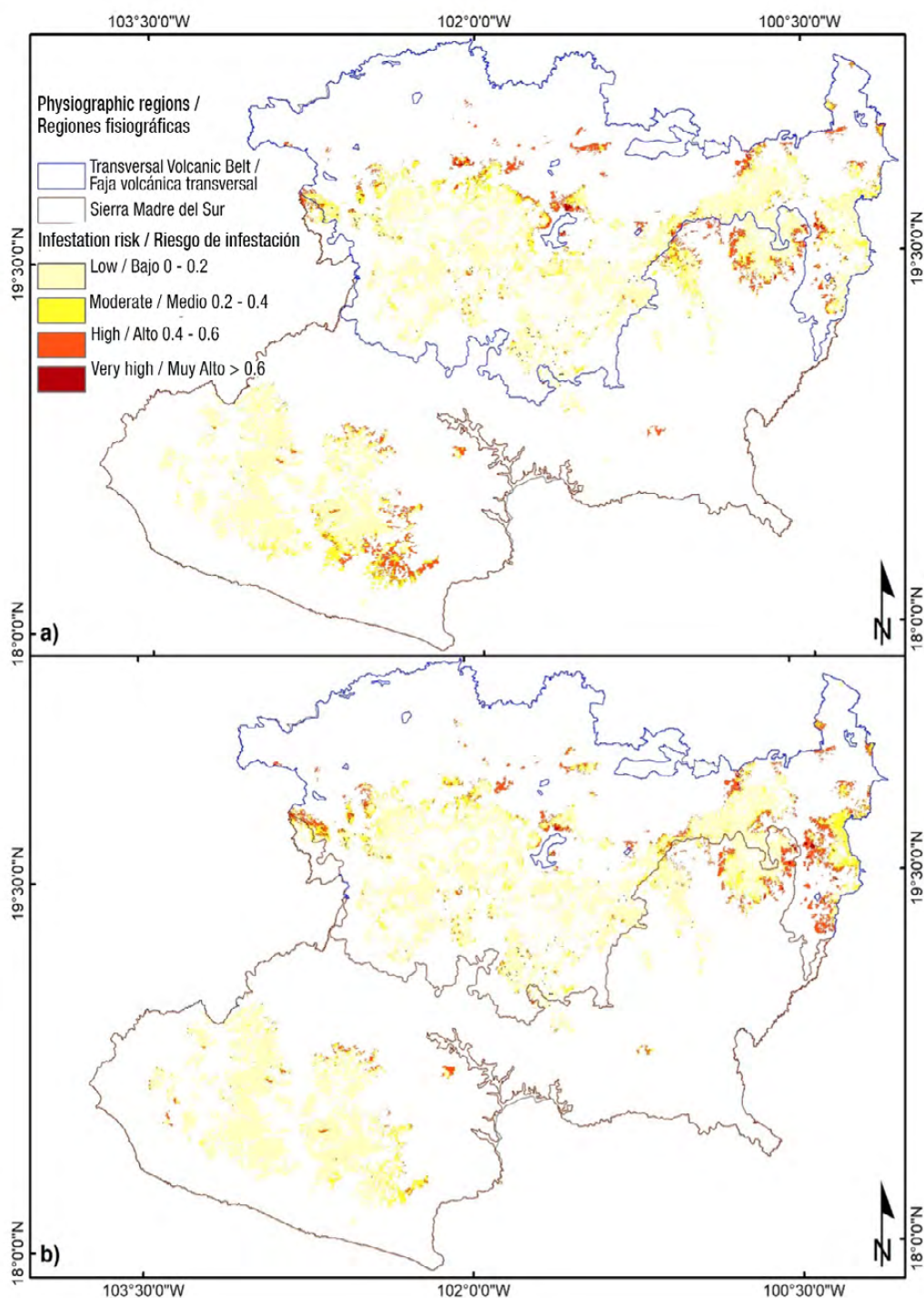


Figure 4. Risk of infestation by *Dendroctonus frontalis* in temperate forests in the state of Michoacán, Mexico. a) period 1910-2009 and b) risk with representative concentration trajectory (RCP 4.5) of low greenhouse gas emissions with near future horizon 2015-2039. Black dots represent outbreaks of the insect reported by CONAFOR (2010-2019).

Figura 4. Riesgo de infestación por *Dendroctonus frontalis* en los bosques de clima templado del estado de Michoacán, México. a) periodo 1910-2009 y b) riesgo con trayectoria de concentración representativa (RCP 4.5) de emisiones bajas de gases de efecto invernadero con horizonte de futuro cercano 2015-2039. Los puntos negros (muy pocos) representan brotes del insecto registrados por la CONAFOR 2010-2019.

Table 3. Cross-classification matrix of surface areas per risk class of *Dendroctonus mexicanus* infestation under the current (1910-2009) and future (2015-2039 climate change RCP 4.5) scenarios.

Cuadro 3. Matriz de clasificación cruzada de las superficies por clase de riesgo de infestación de *Dendroctonus mexicanus* bajo los escenarios actual (1910-2009) y futuro (2015-2039 cambio climático RCP 4.5).

Current period / Periodo actual	Future risk (RCP 4.5 scenario) / Riesgo futuro (escenario RCP 4.5)				Current total area (ha) / Superficie total (ha) actual	Losses (ha) / Pérdidas (ha)
	Low / Bajo	Moderate / Medio	High / Alto	Very high / Muy Alto		
Low / Bajo	582 992	36 726	458	0	620 176	37 184
Moderate / Medio	88 195	158 569	21 369	61	268 195	109 625
High / Alto	17	11 228	23 787	1 293	36 326	12 538
Very high / Muy Alto	0	0	846	1 665	2 511	846
Total area (ha) RCP 4.5 scenario / Superficie total (ha) escenario RCP 4.5	671 204	206 523	46 461	3 019	927 207	160 194
Gains (ha) / Ganancias (ha)	88 212	47 953	22 674	1 354	160 194	

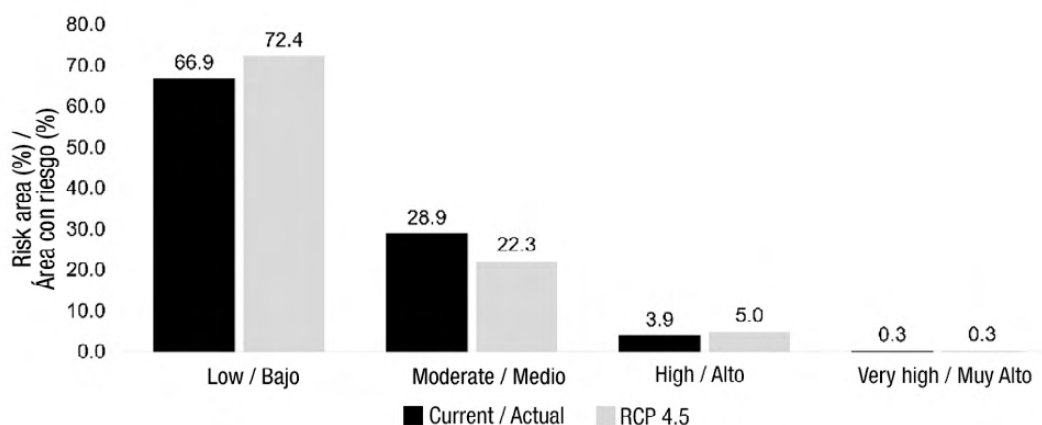


Figure 5. Percentage of the total area in risk categories of infestation by *Dendroctonus mexicanus* for the 1910-2009 scenario and the RCP 4.5 scenario of low greenhouse gas emissions concentration and near future horizon (2015-2039).

Figura 5. Porcentaje del área total en categorías de riesgo de infestación por *Dendroctonus mexicanus* para el escenario 1910-2009 y el escenario RCP 4.5 de concentración de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039).

Comparison of current and future infestation risk

Table 3 shows the cross-classification matrix for *D. mexicanus*; the analysis indicated that 767 013 ha (82.7 %) of the area classified for the period 1910-2009 remained unchanged in the future scenario. The rest of the area (160 194 ha; 17.3 %) underwent a change in the risk category initially assigned (period 1910-2009). The area classified as high risk of infestation increased by 10 135 ha (36 326 to 46 461) and the area classified as very high risk will remain constant in practical terms, as it increased by 508 ha (2 511 to 3 019). In contrast, the area classified in the low-risk category increased from 620 176 ha (66.9 %) in the 1910-2009 scenario to 671 204 ha (72.4 %) for the future scenario (Figure 5), meaning again of 51 028 ha, which results in a decrease in the medium risk category (loss of 61 672 ha). In general, and contrary to common perception, these results indicate that, under the climate change scenario used, the risk of *D. mexicanus* infestation will be lower in the future; however, gains should not go unnoticed, because, in absolute terms, the area classified as high and very high risk in the future scenario will increase by 10 136 and 508 ha, respectively.

Based on Table 4, the comparison of current and future risk for *D. frontalis* indicated that 80.54 % of the area (746 784 ha) remained unchanged and that the area classified with the infestation risks of greatest interest to forest managers (high and very high risk) will be similar in the future scenario (Figure 6). In fact, the area with high-risk class decreased by 11 015 ha (100 353 to 89 338) and the very high-risk class decreased by 82 ha (3 901 to 3 819).

The Kappa index was estimated at 0.91 for *D. mexicanus* and 0.89 for *D. frontalis*. These values suggest a very high concordance (0.81-1.00) (Landis & Koch, 1977) in the spatial distribution of the risk classes mapped in Figures 3 and 4. Kappa values indicate that a significant fraction (the largest part) of the infestation risk classes remain unchanged between the scenarios being compared, which is observed in the graphs in Figures 5 and 6.

Although in Mexico there is an “early warning and risk assessment system for forest pests” (SATERF), managed by the Comisión Nacional Forestal and the Sistema Integral de Vigilancia y Control Fitosanitario Forestal (CONAFOR & SIVICOFF, 2020), the methodological proposal and analysis presented here are new and could contribute to the development of this type of tools. Unlike SATERF, the methodology proposed here defines a hierarchy analyzed of relevant criteria for epidemic outbreaks. Additionally, it incorporates forest density (basal area) as an important factor for predicting the risk of bark beetle outbreaks (Morris et al., 2018; Negrón et al., 2001; Raffa et al., 2015). On the

para el escenario futuro (2015-2039) (Figuras 3 y 4). El valor máximo estimado de riesgo de infestación para *D. mexicanus* fue 0.78 en el escenario actual y 0.83 en el escenario futuro. Para *D. frontalis* se estimaron valores máximos de 0.84 y 0.85 para los escenarios actual y futuro, respectivamente. En ambas especies, las áreas de mayor riesgo se ubican a lo largo de la FVT, lo que coincide con lo reportado por Salinas-Moreno et al. (2010) y Armendáriz-Toledano et al. (2018), quienes indicaron que las condiciones climáticas más favorables para los descortezadores bajo análisis se encuentran sobre la FVT. El riesgo de infestación mapeado es también consistente con los reportes de ocurrencia de brotes registrados en el periodo 2010 a 2019 por la CONAFOR (Figuras 3 y 4); para *D. mexicanus* se reportaron 2 255 registros y 99 registros de *D. frontalis*.

De acuerdo con Armendáriz-Toledano et al. (2018), en la SMS también existen condiciones climáticas ideales para que prosperen ambas especies de descortezadores; sin embargo, los resultados muestran que el riesgo de ocurrencia de un brote en esta zona es menor que el estimado para la FVT. En otro estudio, Salinas-Moreno, Ager, Vargas, Hayes, y Zúñiga (2010) reportaron que las especies de pino más comunes en la FVT y la SMS son muy parecidas, por lo que se puede dar el caso de que *D. mexicanus* y *D. frontalis* se encuentren en la misma zona, debido a que tienen preferencias por hospederos similares y pueden atacar y coexistir en el mismo árbol (Armendáriz-Toledano et al., 2018; Moser et al., 2005). Tanto *D. mexicanus* como *D. frontalis* son especies agresivas que atacan a diversas especies de pino en el hemisferio norte en función de la latitud; aunque en apariencia son especies generalistas, las principales hospedantes de *D. frontalis* en México son *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pringlei* Shaw, *P. teocote* Schiede ex Schltdl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Chamisso, mientras que para *D. mexicanus* son *Pinus leiophylla*, *P. teocote*, *P. pseudostrobus* Lindl., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb. y *P. oocarpa* (Salinas-Moreno et al., 2010).

Comparación del riesgo de infestación actual y futuro

El Cuadro 3 muestra la matriz de clasificación cruzada para el caso de *D. mexicanus*; el análisis indicó que 767 013 ha (82.7 %) de la superficie clasificada en los niveles del periodo 1910-2009 se mantuvo sin cambios en el escenario futuro. El resto de la superficie (160 194 ha; 17.3 %) sufrió cambio en la categoría de riesgo inicialmente asignada (periodo 1910-2009). La superficie clasificada con riesgo alto de infestación incrementó 10 135 ha (36 326 a 46 461) y la superficie con riesgo muy alto permanecerá constante en términos prácticos, ya que incrementó 508 ha (2 511 a 3 019). De manera contraria, la superficie clasificada en la categoría de riesgo bajo incrementó de 620 176

Table 4. Cross-classification matrix of surface areas per risk class of *Dendroctonus frontalis* infestation under current (1910-2009) and future (2015-2039 climate change RCP 4.5) scenarios.

Cuadro 4. Matriz de clasificación cruzada de las superficies por clase de riesgo de infestación de *Dendroctonus frontalis* bajo los escenarios actual (1910-2009) y futuro (2015-2039 cambio climático RCP 4.5).

Current period / Periodo actual	Future risk (RCP 4.5 scenario) / Riesgo futuro (escenario RCP 4.5)				Current total area (ha) / Superficie total (ha) actual	Losses (ha) / Pérdidas (ha)
	Low / Bajo	Moderate / Medio	High / Alto	Very high / Muy Alto		
Low / Bajo	641 133	33 082	13 688	0	687 902	46 770
Moderate / Medio	60 607	51 442	22 606	395	135 051	83 608
High / Alto	13 751	33 925	51 731	946	100 353	48 622
Very high / Muy Alto	0	110	1 313	2 478	3 901	1 423
Total area (ha) RCP 4.5 scenario / Superficie total (ha) escenario RCP 4.5	715 491	118 559	89 338	3 819	927 207	180 424
Gains (ha) / Ganancias (ha)	74 358	67 117	37 607	1 341	180 424	

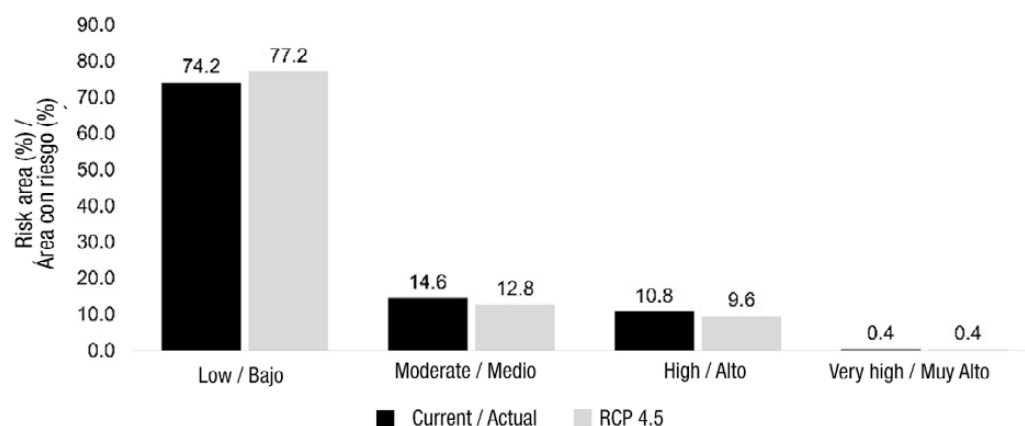


Figure 6. Percentage of the total area in categories at risk of infestation by *Dendroctonus frontalis* for the current scenario (1910-2009) and the RCP 4.5 scenario of low greenhouse gas emissions concentration and near-future horizon (2015-2039).

Figura 6. Porcentaje del área total en categorías de riesgo de infestación por *Dendroctonus frontalis* para el escenario actual (1910-2009) y el escenario RCP 4.5 de concentración de emisiones bajas de gases de efecto invernadero y horizonte de futuro cercano (2015-2039).

other hand, there is also an improvement in the scale on which the results are presented. SATERF publishes national and state maps per month; at the national level it issues statements which determines high risk in forest areas of Michoacán and by entities it reports high risk in most of the SMS and the southwest of the TVB (CONAFOR & SIVICOFF, 2020b), which makes it difficult to find references for the confirmation or contrast of the results.

The future climate scenario (RCP 4.5) predicts an increase in temperature and a decrease in precipitation. According to Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval, and Beaulieu (2012), temperature will increase by 1.4 °C and precipitation will decrease by about 5.6 % in Michoacán by 2030. Considering that the most important criterion for the experts was climate (0.45), an increase in the level of risk was expected in the future scenario; however, precipitation and temperature maps analyzed in data processing indicated that some areas that make up the forests of Michoacán will have higher precipitation and lower temperatures in the future scenario. These forecasts are reflected in the spatial estimation of infestation risk, so that medium risk areas for the current scenario have a larger area than those of the future scenario.

Morales-Rangel et al. (2018) propose an approximate 3.0 °C increase in mean annual temperature by 2030, which would favor the incidence of *D. mexicanus* and *D. frontalis* outbreaks in places previously reported to be at low risk. The results of this research give reason to conclude that such an assertion is debatable, because it omits the future occurrence of temperature and precipitation conditions less favorable for the development of bark beetles, which will tend to balance the expected changes for infestation risk in forests of Michoacán.

Conclusions

Maps generated indicate that forests of Michoacán with higher risk of *Dendroctonus mexicanus* and *D. frontalis* infestation, for the future scenario (2015-2039), are those located in the Transversal Volcanic Belt; the highest risk of infestation by the two species is predicted in the northeastern part of the state. Continuous monitoring and silvicultural practices that favor adequate tree density are recommended activities to maintain the forest in a healthy condition and prevent outbreaks of pine bark beetles. It is important that density does not exceed the capacity of the site index. The methodology used represents a support tool for spatial analysis of the risk of bark beetle outbreaks and for decision making regarding monitoring, prevention and application of sanitary measures for the control of *D. mexicanus* and *D.*

ha (66.9 %) en el escenario 1910-2009 a 671 204 ha (72.4 %) para el escenario futuro (Figura 5), significando una ganancia de 51 028 ha, lo cual ocasiona disminución en la categoría de riesgo medio (pérdida de 61 672 ha). En general, y contrario a la percepción común, estos resultados indican que, bajo el escenario de cambio climático utilizado, el riesgo de brotes por *D. mexicanus* será menor en el futuro; sin embargo, la ganancia no debe pasar desapercibida, ya que, en términos absolutos, la superficie clasificada con riesgo alto y muy alto en el escenario futuro incrementará 10 136 y 508 ha, respectivamente.

Con base en el Cuadro 4, el comparativo de riesgo actual y futuro para *D. frontalis* indicó que 80.54 % de la superficie (746 784 ha) no sufrió cambio y que la superficie clasificada con los riesgos de infestación de mayor interés para los administradores de áreas forestales (riesgo alto y muy alto) será similar en el escenario futuro (Figura 6). De hecho, la superficie de la clase de riesgo alto disminuyó 11 015 ha (100 353 a 89 338) y la clase de riesgo muy alto disminuyó 82 ha (3 901 a 3 819).

El índice Kappa se estimó en 0.91 para *D. mexicanus* y 0.89 para *D. frontalis*. Estos valores sugieren una concordancia muy alta (0.81-1.00) (Landis & Koch, 1977) en la distribución espacial de las clases de riesgo mapeadas en las Figuras 3 y 4. Los valores de Kappa indican que una fracción importante (la mayor parte) de las clases de riesgo de infestación permanecen sin variación entre los escenarios que se están comparando, lo cual se observa en las gráficas de las Figuras 5 y 6.

Aunque en México existe un “sistema de alerta temprana y de evaluación de riesgo de plagas forestales” (SATERF), administrado por la Comisión Nacional Forestal y el Sistema Integral de Vigilancia y Control Fitosanitario Forestal (CONAFOR & SIVICOFF, 2020), la propuesta metodológica y el análisis aquí presentado son novedosos y podrían aportar al desarrollo de este tipo de herramientas. A diferencia del SATERF, la metodología aquí planteada define una jerarquía ponderada de los criterios relevantes para que se presenten brotes epidémicos. Adicionalmente, incorpora a la densidad forestal (área basal) como un factor importante para la predicción del riesgo de brotes de descortezadores (Morris et al., 2018; Negrón et al., 2001; Raffa et al., 2015). Por otro lado, también se aporta una mejora en la escala en la que se presentan los resultados. El SATERF publica mapas nacionales y estatales por mes; a nivel nacional emite pronunciamientos en los que determina riesgo alto en las zonas forestales de Michoacán y por entidades reporta riesgo alto en la mayoría de la SMS y el suroeste de la FVT (CONAFOR & SIVICOFF, 2020b), lo que

frontalis in Michoacán, but applicable to other areas if the required data is available.

End of English version

References / Referencias

- Armendáriz-Toledano, F., Zuñiga, G., García-Román, L. J., Valerio-Mendoza, O., & García-Navarrete, P. G. (2018). *Guía ilustrada para identificar las especies del género Dendroctonus presentes en México y Centroamérica*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Bennie, J., Huntley, B., Wiltshire, A., Hill, M. O., & Baxter, R. (2008). Slope, aspect and climate: Spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling*, 216(1), 47-59. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.04.010
- Bentz, B. J., Jönsson, A. M., Schroeder, M., Weed, A., Anna, R., Wilcke, I., & Larsson, K. (2019). *Ips typographus* and *Dendroctonus ponderosae* models project thermal suitability for intra- and inter-continental establishment in a changing climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 1-17. doi: 10.3389/ffgc.2019.00001
- Billings, R. F., Clarke, S. R., Espino, M. V., Córdón, C. P., Meléndez, F. B., Campos, R. J., & Baeza, G. (2004). Gorgojo descortezador e incendios: una combinación devastadora para los pinares de América Central. *Unasylva*, 217(55), 15-21. Retrieved from <https://www.barkbeetles.org/centralamerica/y5507s06.pdf>
- Bone, C., Wulder, M. A., White, J. C., Robertson, C., & Nelson, T. A. (2013). A GIS-based risk rating of forest insect outbreaks using aerial overview surveys and the Local Moran's I Statistic. *Applied Geography*, 40, 161-170. doi: 10.1016/j.apgeog.2013.02.011
- Chapman, T. B., Veblen, T. T., & Schoennagel, T. (2012). Spatiotemporal patterns of mountain pine beetle activity in the southern Rocky Mountains. *Ecology*, 93(10), 2175-2185. doi: 10.1890/11-1055.1
- Chirinos, L. R., & Mallqui, C. G. (2016). Comparación entre interpoladores espaciales en el estudio de distribución de partículas sedimentables insolubles en la cuenca atmosférica de Lima y Callao. *Información Tecnológica*, 27(4), 111-120. doi: 10.4067/S0718-07642016000400012
- Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM). (2015). *Inventario estatal forestal y de suelos Michoacán de Ocampo 2014*. Morelia, Michoacán, México: Author. Retrieved from <https://cofom.michoacan.gob.mx/inventario-estatal-forestal-y-de-suelos-michoacan-de-ocampo-2014/>
- Comisión Nacional Forestal & Sistema Integral de Vigilancia y Control Fitosanitario Forestal (CONAFOR-SIVICOFF). (2020). Sistema de alerta temprana en sanidad forestal. Retrieved from <http://sivicoff.cnf.gob.mx/Default.aspx>
- Comisión Nacional Forestal & Sistema Integral de Vigilancia y Control Fitosanitario Forestal (CONAFOR-SIVICOFF). (2020b). Mapas de alerta temprana. Retrieved from <http://sivicoff.cnf.gob.mx/frmMapasdeRiesgodePlagasForestales.aspx>

dificulta encontrar referencias para la confirmación o contrastación de los resultados.

El escenario climático futuro (RCP 4.5) pronostica aumento en la temperatura y disminución en la precipitación. De acuerdo con Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval, y Beaulieu (2012), la temperatura aumentará 1.4 °C y la precipitación disminuirá alrededor de 5.6 % en Michoacán para 2030. Considerando que el criterio más importante para los expertos fue el clima (0.45), se esperaba aumento en el nivel de riesgo en el escenario futuro; sin embargo, los mapas de precipitación y temperatura analizados en el procesamiento de la información indicaron que algunas áreas que conforman los bosques de Michoacán tendrán mayor precipitación y menores temperaturas en el escenario futuro. Estos pronósticos se reflejan en la estimación espacial del riesgo de infestación, de tal manera que las áreas de riesgo medio para el escenario actual presentan mayor superficie que las del escenario futuro.

Morales-Rangel et al. (2018) sugieren un aumento aproximado de 3.0 °C en la temperatura media anual para el 2030, lo cual favorecería la incidencia de brotes de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en lugares donde antes se reportaba bajo riesgo. Los resultados de esta investigación dan pie para argumentar que tal aseveración es debatible, debido a que se omite la ocurrencia futura de condiciones de temperatura y precipitación menos favorables para el desarrollo de los descortezadores, lo que tenderá a equilibrar los cambios esperados en el riesgo de infestación en los bosques del estado de Michoacán.

Conclusiones

Los mapas generados indican que los bosques del estado de Michoacán con mayor riesgo de infestación por *Dendroctonus mexicanus* y *D. frontalis*, para el escenario futuro (2015-2039), son los ubicados en la Faja Volcánica Transversal; el riesgo más alto de infestación por las dos especies se pronostica en la parte noreste del estado. El monitoreo continuo y las prácticas silvícolas que favorezcan la densidad arbórea adecuada son actividades recomendables para mantener el bosque en condición saludable y prevenir brotes de insectos descortezadores de pino. Es importante que la densidad no rebase la capacidad del índice de sitio. La metodología empleada representa una herramienta de apoyo para el análisis espacial del riesgo de brotes de insectos descortezadores y para la toma de decisiones respecto al monitoreo, la prevención y la aplicación de medidas sanitarias para el control de *D. mexicanus* y *D. frontalis* en Michoacán, pero de aplicación a otras áreas si se disponen los datos requeridos.

Fin de la versión en español

- Comisión Nacional Forestal & Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (CONAFOR & SNIGF). (2020). Programa del manejo del fuego. Polígonos de incendios forestales. Retrieved from <https://snigf.cnf.gob.mx/incendios-forestales/>
- Comisión Nacional Forestal & Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (CONAFOR & SNIGF). (2020b). Base de datos. Retrieved from https://snigf.cnf.gob.mx/resultados-2009-2014-resultados-que-recaba-los-principales-indicadores-forestales-generados-a-partir-del-analisis-estadistico-de-las-variables-levantadas-en-campo/#superficie_acord
- Cuéllar-Rodríguez, G., Equihua-Martínez, A., Villa-Castillo, J., Estrada-Venegas, E. G., & Romero-Nápoles, T. M. (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides* Zucc. atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 42-49. doi: 10.29298/rmcf.v4i17.1419
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437. doi: 10.1002/joc.3848
- Dhar, A., Parrott, L., & Heckbert, S. (2018). Large scale biotic damage impacts on forest ecosystem services. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(8), 741-755. doi: 10.1080/02827581.2018.1495256
- Eastman, J. R. (2016). TerrSet Geospatial monitoring modeling system. Retrieved from <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>
- IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del grupo de trabajo III al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: Author.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., Romero, C. R., Conde, Á. A. C., & Trejo, V. R. I. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudio de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Retrieved from http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf
- Fonseca, G. J., Llanderal, C. C., Cibrián, T. D., Equihua, M. A., & de los Santos, P. H. M. (2009). Secuencia de arribo de coleópteros en árboles de *Pinus montezumae* Lamb. dañados por incendios. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(106), 149-170. Retrieved from <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/editorial/index.php/forestales/article/view/680/1687>
- Gómez, D. M. & Barredo, C. J. I. (2005). *Sistema de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2.a ed.). Madrid, España: Ed. Alfaomega.
- González-Hernández, A., Morales-Villafañá, R., Romero-Sánchez, M. E., Islas-Trejo, B., & Pérez-Miranda, R. (2018). Modelling potential distribution of a pine bark beetle in Mexican temperate forests using forecast data and spatial analysis tools. *Journal of Forestry Research*, 31(2), 649-659. doi: 10.1007/s11676-018-0858-4
- Hausfather, Z., & Peters, G. P. (2020). RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 27791-27792. doi: 10.1073/pnas.2017124117
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018*. México: Author. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825107017>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Krist, F. J., Sapio, F. J., & Tracz, B. M. (2007). Mapping risk from forest insects and diseases. Retrieved from https://www.fs.fed.us/foresthealth/technology/pdfs/FHTET2007-06_RiskMap.pdf
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. doi: 10.2307/2529310
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Ontario, Canada: John Wiley & Sons, inc.
- Martínez, P. J. E., Martín, M. J., & Román, S. E. (2000). Paisajes amenazados de la cuenca mediterránea: aplicación del SIG en el análisis de la dinámica de usos del territorio (1956-1998) en la Vall de Gallinera (Alicante-España). *Mediterránea. Serie de Estudios Biológicos, Época II*, 17, 51-60. doi: 10.14198/MDTRRA2000.17.06
- Morales-Rangel, A., Cambrón-Sandoval, V. H., Soto-Correa, J. C., Jones, R. W., & Obregón-Zuñiga, J. A. (2018). Efecto de la temperatura en poblaciones de *Dendroctonus frontalis* Zimmerman y *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) bajo un escenario de cambio climático en la Sierra Gorda Queretana. *Acta Zoológica Mexicana*, 34(1), 1-8. doi: 10.21829/azm.2018.3412141
- Morris, J. L., Cottrell, S., Fettig, C. J., Derose, R. J., Mattor, K. M., Carter, V. A., ... Seybold, S. J. (2018). Bark beetles as agents of change in social - ecological systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(S1), 34-43. doi: 10.1002/fee.1754
- Moser, J. C., Fitzgibbon, B. A., & Klepzig, K. D. (2005). The mexican pine beetle, *Dendroctonus mexicanus*: first record in the United States and co-occurrence with the southern pine beetle - *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Scolytidae or Curculionidae: Scolytinae). *Entomological News*, 116(4), 235-243. Retrieved from <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/21320>
- Negrón, J. F., Anhold, J. A., & Munson, A. S. (2001). Withstand spatial distribution of tree mortality caused by the Douglas-Fir Beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Environmental Entomology*, 30(2), 215-224. doi: 10.1603/0046-225X-30.2.215
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G., & Romme, W. H. (2008). Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *BioScience*, 58(6), 501-517. doi: 10.1641/B580607
- Raffa, K. F., Grégoire, J. C., & Lindgren, B. S. (2015). Natural history and ecology of bark beetles. In F. E. Vega, & R. W. Hofstetter (Eds.), *Bark beetles: biology and ecology of native and invasive species* (pp. 1-40). USA: Academic Press.
- Rubin-Aguirre, A., Saenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R., Del-Rio-Mora, A. A., Tena-Morelos, C. A., & Campos-Bolaños, R. (2015). Bark beetle pests in an altitudinal gradient of a Mexican managed forest. *Forest Ecology and Management*, 343, 73-79. doi: 10.1016/j.foreco.2015.01.028

- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. USA: McGraw-Hill.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2012). Modelos “spline” de climas contemporáneo, 2030, 2060 y 2090 para Michoacán, México. Impactos en la vegetación. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 333-345. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/35-4.html>
- Salinas-Moreno, Y., Ager, A., Vargas, C. F., Hayes, J. L., & Zúñiga, G. (2010). Determining the vulnerability of Mexican pine forests to bark beetles of the genus *Dendroctonus* Erichson (Coleoptera : Curculionidae: Scolytinae). *Forest Ecology and Management*, 260, 52-61. doi: 10.1016/j.foreco.2010.03.029
- Salinas-Moreno, Y., Mendoza, M. G., Barrios, M. A., Cisneros, R., Macías-Sámano, J., & Zuñiga, G. (2004). Areography of the genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Mexico. *Journal of Biogeography*, 31(7), 1163-1177. doi: 10.1111/j.1365-2699.2004.01110.x
- Salinas-Moreno, Y., Vargas Mendoza, C. F., Zuñiga, G., Víctor, J., Ager, A., & Hayes, J. L. (2010). *Atlas de distribución geográfica de los descortezadores del género Dendroctonus (Curculionidae: Scolytinae) en México*. México: Instituto Politécnico Nacional-Comisión Nacional Forestal.
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., ... Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Publishing Group*, 7(6), 395-402. doi: 10.1038/nclimate3303
- Šmelko, Š., & Merganič, J. (2008). Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia. *Journal of Forest Science*, 54, 476-483. doi: 10.17221/26/2008-JFS
- Soto-Correa, J. C., Avilés-Carrillo, I., Girón-Gutiérrez, D., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2019). Abundancia altitudinal de *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae) en relación a variables climáticas en Hidalgo, México. *Revista de Biología Tropical*, 67(3), 370-379. doi: 10.15517/RBT.V67I3.34436
- United States Department of Agriculture (USDA) Forest Service. (2018). The summary of areas with tree mortality from bark beetles in the Western US from 2000-2017. Retrieved from https://www.fs.fed.us/foresthealth/applied-sciences/news/2018/wbb_summary.shtml

