

# Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán

Modelado de la distribución potencial de especies de Pinaceae bajo escenarios de cambio climático en Michoacán

Gustavo Cruz-Cárdenas<sup>1</sup>; Lauro López-Mata<sup>2</sup>; José Teodoro Silva<sup>1</sup>; Nelly Bernal-Santana<sup>3</sup>; Francisco Estrada-Godoy<sup>4</sup>; José A. López-Sandoval<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Michoacán, COFAA. Justo Sierra núm. 28. C. P. 59510. Jiquilpan, Michoacán, México. Correo-e: guscruz@ipn.mx, gustavo.cruz.cardenas@gmail.com Tel: +52 (353)5330083 (\*Autor para correspondencia).

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. C. P. 56230. Texcoco, México, México.

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Maestría en Producción Agrícola Sustentable. Justo Sierra núm. 28. C. P. 59510. Jiquilpan, Michoacán, México.

<sup>4</sup>Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA), Unidad Ticomán, COFAA. Av. Ticomán núm. 600, col. San José Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero. C. P. 07340. México, D. F.

<sup>5</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas. El Cerrillo Piedras Blancas. C. P. 50200. Toluca, Estado de México, México.

## Abstract

Michoacán is the fifth state with the greatest diversity of plant species, excelling due to its richness in families, genera and species of flowering trees in Mexico. Therefore, in this paper the potential distribution of 12 species of Pinaceae was evaluated in current conditions and future climate change scenarios through ecological niche models. Data on the current climate, future scenarios, soil properties and digital elevation model were used as environmental predictors. The modeling was done using the Maxent software. 75 % of the data on the species presence was used for the training of the models and the remaining 25 % for model validation. The output grids were classified into three categories of area for the species distribution: unsuitable, marginal and suitable. The models show that there will be a 16 to 40 % decrease in suitable areas in the 2015-2039 and 2075-2099 periods, respectively. The species most affected by the decrease in their distribution will be *Abies religiosa*, *Pinus leiophylla* and *Pinus teocote*.

**Keywords:** Maximum entropy, neural networks, ecological niche, endemic species.

## Resumen

Michoacán es el quinto estado con mayor diversidad de especies vegetales, sobresaliendo por su riqueza en familias, géneros y especies de la flora arbórea en México. Por lo anterior, en este trabajo se evaluó la distribución potencial de 12 especies de Pinaceae en condiciones actuales y escenarios futuros de cambio climático, mediante modelos de nicho ecológico. Se utilizaron datos del clima actual, de escenarios futuros, de propiedades de suelos y el modelo digital de elevación como predictores ambientales. El modelado se realizó con el software Maxent, 75 % de los datos de presencia de las especies se utilizó para el entrenamiento de los modelos y el 25 % restante para su validación. Los *grids* de salida se clasificaron en tres categorías de áreas para la distribución de las especies: no idónea, marginal e idónea. Los modelos muestran que habrá una disminución de 16 y 40 % de áreas idóneas en los horizontes 2015-2039 y 2075-2099, respectivamente. Las especies más afectadas en la reducción de su distribución serán *Abies religiosa*, *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*.

**Palabras clave:** Máxima entropía, redes neuronales, nicho ecológico, especies endémicas.

## Introduction

Climate change has been documented at broad resolution scales since the mid XX century. Since then, huge quantities of resources have been invested in the understanding of the phenomenon and its possible consequences on species distribution (Martínez-Meyer, 2005). Paleoecological evidence indicates that the distribution area of some species has contracted or expanded on various occasions since the last ice age; therefore, it is assumed that in the future there could be a similar phenomenon. The decrease or increase in the geographic distribution ranges of the species are in function of their adaptability to the climate change. Such adaptability is related to genetic variation; the species with less variation will be more susceptible to extinction (Hamrick, 2004).

Some studies recommend that species sensitive to climate change must be examined closely in order to define preservation strategies *ex situ* (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012; Viveros-Viveros et al., 2009). An alternative study to evaluate the impact of climate change on the geographic space of the species is through the use of species distribution models or ecological niche models (Jeschke & Strayer, 2008; Peterson, 2006).

The species distribution modeling is done with two techniques: mechanistic and correlative. The former is based on physiological experiments of a particular species, whereas the latter links the environmental variables with the areas of species occurrence (Anderson & Raza, 2010). The generated niche model is applied to a geographic space in order to identify ideal areas for species distribution. This type of modeling utilizes predicted future climates based on a combination of general atmosphere-ocean circulation models and reports of various scenarios. Such models pose different hypotheses on the effect of oceans and the atmosphere on climate; the effect is characterized by different supposed futures of socioeconomic and technological development (Real, Luz Márquez, Olivero, & Estrada, 2010).

An important aspect in modeling the species distribution is delimiting the area of study prior to modeling, especially when invasive species or climate change are investigated, so that the predictive models have a high transferability (Anderson & Raza, 2010). In the case of this study, the state of Michoacán was selected due to it being one of the entities with greatest plant diversity in Mexico (Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo-Amezcuca, Cornejo-Tenorio, & Ibarra-Manríquez, 2006; Villaseñor, 2003). Among them, the Pinaceae family represents 27 % of the total area of study and at least 15 species belong to the *Pinus* genus (Cué et al., 2006; Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010). The importance of these species lies in their instrumental

## Introducción

El cambio climático se ha documentado a escalas de resolución amplia a partir de la segunda mitad del siglo XX. Desde entonces se han invertido cantidades enormes de recursos en el entendimiento del fenómeno y sus posibles consecuencias en la distribución de especies (Martínez-Meyer, 2005). Evidencias paleoecológicas indican que el área de distribución de algunas especies se ha contraído o expandido en varias ocasiones desde la última era glacial; por tanto, se asume que en el futuro puede existir un fenómeno parecido. La reducción o el aumento de los rangos de distribución geográfica de las especies está en función de su adaptabilidad al cambio climático. Tal adaptabilidad se relaciona con la variación genética; aquellas especies con menor variación serán las más propensas a la extinción (Hamrick, 2004).

Algunos estudios recomiendan que las especies sensibles al cambio climático deben examinarse estrechamente, para definir estrategias de conservación *ex situ* (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012; Viveros-Viveros et al., 2009). Una alternativa de estudio para evaluar el impacto del cambio climático sobre el espacio geográfico de las especies es a través de modelos de distribución de especies o modelos de nicho ecológico (Jeschke & Strayer, 2008; Peterson, 2006).

El modelado de distribución de especies se hace con dos técnicas: las mecanicistas y las correlativas. Las primeras se basan en experimentos fisiológicos de alguna especie en particular, mientras que las segundas relacionan las variables ambientales con las localidades de ocurrencia de las especies (Anderson & Raza, 2010). El modelo generado de nicho se aplica a un espacio geográfico para identificar áreas idóneas para la distribución de la especie. Este tipo de modelado emplea climas futuros predichos con base en la combinación de modelos de circulación general atmósfera-oceano y reportes de diferentes escenarios. Dichos modelos plantean hipótesis diferentes sobre el efecto de los océanos y la atmósfera sobre el clima; el efecto es caracterizado por diferentes supuestos futuros socioeconómicos y de desarrollo tecnológico (Real, Luz Márquez, Olivero, & Estrada, 2010).

Uno de los aspectos importantes en el modelado de distribución de especies es la delimitación del área de estudio previo a la modelación, especialmente cuando se investigan especies invasivas o cambio climático, de tal forma que los modelos predictivos tengan una alta transferibilidad (Anderson & Raza, 2010). En el caso de este trabajo se seleccionó el estado de Michoacán por ser una de las entidades con mayor diversidad de plantas en México (Cué-Bär, Villaseñor, Arredondo-Amezcuca, Cornejo-Tenorio, & Ibarra-Manríquez, 2006; Villaseñor,

and intrinsic value. The former refers to goods such as food, fuel, nutrient recycling, water filtration, and contamination adsorption, and it can acquire greater economic value if the possibilities of biotechnology in genetic engineering are considered in the future. With regard to the intrinsic value, the decrease in biological diversity represents the loss of genetic viability of the species and ecosystems, for example, the loss of tree species and, in turn, the loss of habitat for other species such as *Danaus plexippus* L. (monarch butterfly) (Meléndez, 2010; Sáenz-Romero et al., 2012; Villaseñor, 2005). In Mexico, there is no adequate system to designate protection areas for *Pinus* species (56 species) sensitive to climate change, given that less than 10 % of the distribution area is designated as a natural protected area (Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010).

This paper had the objective of evaluating the impact of climate change on the potential distribution of 12 Pinaceae species (10 pines and two fir trees) in Michoacán, with the purpose of identifying the species that will be most affected.

## Materials and methods

### Area of study

The state of Michoacán (Figure 1) has an approximate surface area of 58,864 km<sup>2</sup>. Altitudes vary from sea level up to 3,840 m (Tancitaro volcano); the average altitude is 1,343 m. The state is located inside three physiographic regions: the Balsas Depression, the Pacific Coast and the Trans-Mexican Volcanic Belt. The main types of rocks are basic and acid extrusive igneous (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Información [INEGI], 1988). The most prominent types of soil are Vertisol, Luvisol, Latosol, Andosol, Regosol and Phaeozem (INEGI, 1988). The electric conductivity of the soils is less than 0.22 dS·m<sup>-1</sup> and the content of organic matter varies from 1.4 to 3.4 %; the greatest soil ratio has a slightly to moderate acidic pH (Cruz-Cárdenas et al., 2014). The climate types are warm sub-humid ( $Aw_1$ ,  $Aw_0$ ) and temperate sub-humid ( $C(w_1)$ ,  $C(w_2)$ ) (García, 1990); the minimum and maximum temperature averages are 13.8 and 29.4 °C, respectively, with an average precipitation of 850 mm. The main plant communities found in Michoacán are: coniferous forests, oak forests, mountainous cloud forests, deciduous tropical forests, subtropical thickets, thorn forests and tropical semi-deciduous forests (Villaseñor, 2005).

### Occurrence data

Two hundred records of species occurrence were obtained for pines and fir trees in the state of Michoacán, which are housed in the national herbarium (MEXU) in the Institute of Biology at the Universidad Nacional

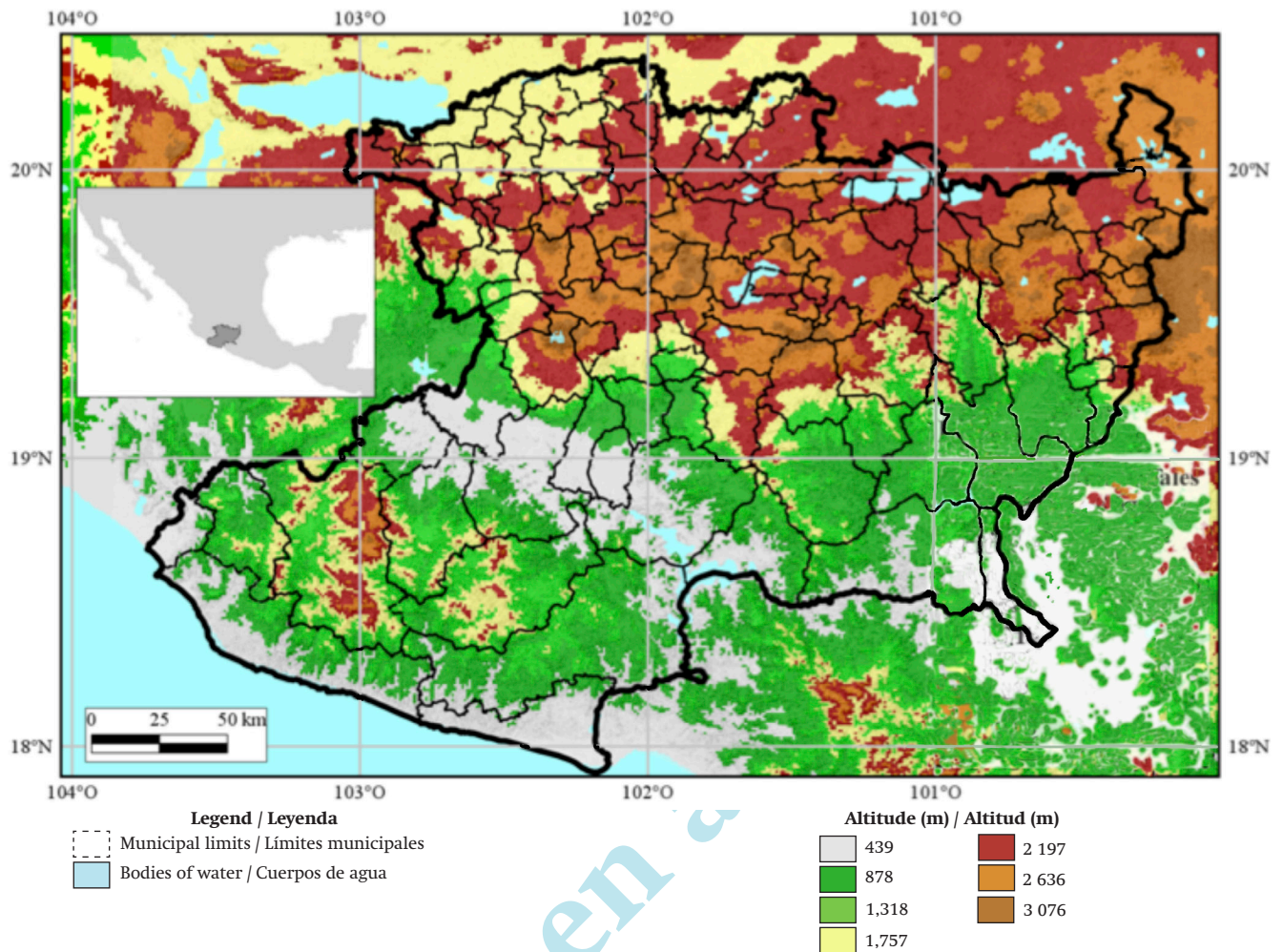
2003). Entre ellas, la familia Pinaceae representa 27 % del total y al menos 15 especies pertenecen al género *Pinus* (Cué-Bär et al., 2006; Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010). La importancia de estas especies radica en su valor instrumental e intrínseco. El primero se refiere a bienes como los alimentos, combustibles, reciclaje de nutrientes, filtración de agua, absorción de contaminación, y puede adquirir mayor valor económico si se consideran las posibilidades de la biotecnología en ingeniería genética en el futuro. En cuanto al valor intrínseco, la disminución de la diversidad biológica representa la pérdida de la viabilidad genética en especies y ecosistemas; por ejemplo, la pérdida de especies arbóreas y, a su vez, de hábitat de otras especies como *Danaus plexippus* L. (mariposa monarca) (Meléndez, 2010; Sáenz-Romero et al., 2012; Villaseñor, 2005). En México no existe un sistema adecuado para designar áreas de protección para especies de *Pinus* (56 especies) sensibles al cambio climático, pues menos de 10 % del área de distribución se destina como área natural protegida (Gutiérrez & Duivenvoorden, 2010).

En este trabajo se planteó evaluar el impacto del cambio climático sobre la distribución potencial de 12 especies de Pinaceae (10 pinos y dos abetos) en Michoacán, con el propósito de identificar las especies que serán más afectadas.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estado de Michoacán (Figura 1) tiene una superficie aproximada de 58,864 km<sup>2</sup>. La altitud varía desde el nivel del mar hasta 3,840 m (Volcán del Tancítaro); la altitud media es de 1,343 m. El estado se encuentra dentro tres regiones fisiográficas: Depresión del Balsas, Costa del Pacífico y Eje Neovolcánico. Los principales tipos de rocas son ígneas extrusivas básicas y ácidas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática [INEGI], 1988). Los tipos de suelos que destacan son Vertisoles, Luvisoles, Litosoles, Andosoles, Regosoles y Feozems (INEGI, 1988). La conductividad eléctrica de los suelos es menor de 0.22 dS·m<sup>-1</sup> y el contenido de materia orgánica varía de 1.4 a 3.4 %; la mayor proporción de suelo tiene pH ligeramente a moderadamente ácido (Cruz-Cárdenas et al., 2014). Los tipos de clima son cálido subhúmedo ( $Aw_1$ ,  $Aw_0$ ) y templado subhúmedo ( $C(w_1)$ ,  $C(w_2)$ ) (García, 1990); el promedio de la temperatura mínima y máxima es 13.8 y 29.4 °C, respectivamente, con precipitación media de 850 mm. Las principales comunidades vegetales que se encuentran en Michoacán son bosque de coníferas, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio, matorral subtropical, bosque espinoso y bosque tropical subcaducifolio (Villaseñor, 2005).



**Figure 1. Area of study of the potential distribution of 12 species of Pinaceae in the state of Michoacán.**

**Figura 1. Área de estudio de la distribución potencial de 12 especies de Pinaceae en el estado de Michoacán.**

Autónoma de México. The species studied with a corresponding record number are: *Abies guatemalensis* Rehd. (4), *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. (22), *Pinus douglasiana* Martínez (11), *Pinus hartwegii* Lindl. (5), *Pinus lawsonii* Roehl ex Gordon (15), *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. (48), *Pinus michoacana* Martínez (36), *Pinus montezumae* Lamb. (15), *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (4), *Pinus pseudostrobus* Lindl. (18), *Pinus rzedowskii* Madrigal & M. Caball. (15) and *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. (7).

#### Bioclimatic data

Nineteen bioclimatic variables were generated (Table 1) for current and future conditions, derived from the information regarding precipitation and minimum and maximum temperatures, utilizing the DIVA-GIS 7.5 software (Hijmans, Cruz, & Guarino, 2012). The baseline data corresponds to the daily climatological base (1960-2000) of the National Meteorological Service of the National Water Commission (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, & Romero-Centeno, 2015a). In regard to the future conditions, two scenarios of radiative forcing or representative concentration pathways (RCP) were used, with low (RCP 4.5 W·m<sup>-2</sup>) and high (RCP

#### Datos de presencia

Se obtuvieron 200 registros de presencia de especies de pinos y abetos en el estado de Michoacán, los cuales están alojados en el herbario nacional (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las especies estudiadas con número de registro correspondiente son: *Abies guatemalensis* Rehd. (4), *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. (22), *Pinus douglasiana* Martínez (11), *Pinus hartwegii* Lindl. (5), *Pinus lawsonii* Roehl ex Gordon (15), *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. (48), *Pinus michoacana* Martínez (36), *Pinus montezumae* Lamb. (15), *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (4), *Pinus pseudostrobus* Lindl. (18), *Pinus rzedowskii* Madrigal & M. Caball. (15) y *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. (7).

#### Datos bioclimáticos

Se generaron 19 variables bioclimáticas (Cuadro 1) para condiciones actuales y futuras, a partir de la información de precipitación, temperatura mínima y máxima empleando el software DIVA-GIS 7.5 (Hijmans, Cruz, & Guarino, 2012). Los datos para la línea base

**Table 1. Bioclimatic variables of current and future conditions, utilized in the study of the potential distribution of 12 Pinaceae species in Michoacán.****Cuadro 1. Variables bioclimáticas de condiciones actuales y futuras, utilizadas en el estudio de la distribución potencial de 12 especies de Pinaceae en Michoacán.**

Variable	Description / Descripción
bio1	Annual Mean Temperature / Temperatura media anual
bio2	Mean Diurnal Range ( $T_{max} - T_{min}$ ) / Rango promedio de temperaturas diarias ( $T_{max} - T_{min}$ )
bio3	Isothermality (bio2/bio7) × 100 / Isothermalidad (bio2/bio7) × 100
bio4	Temperature Seasonality (standard deviation × 100) / Estacionalidad de la temperatura (Desviación estándar × 100)
bio5	Maximum Temperature of Warmest Month / Temperatura máxima del mes más cálido
bio6	Minimum Temperature of Coldest Month / Temperatura mínima del mes más frío
bio7	Temperature Annual Range (bio5–bio6) / Rango anual de la temperatura (bio5–bio6)
bio8	Mean Temperature of Wettest Quarter / Temperatura media del trimestre más húmedo
bio9	Mean Temperature of Driest Quarter / Temperatura media del trimestre más seco
bio10	Mean Temperature of Warmest Quarter / Temperatura media del trimestre más cálido
bio11	Mean Temperature of Coldest Quarter / Temperatura media del trimestre más frío
bio12	Annual Precipitation / Precipitación anual
bio13	Precipitation of Wettest Month / Precipitación del mes más húmedo
bio14	Precipitation of Driest Month / Precipitación del mes más seco
bio15	Precipitation Seasonality / Estacionalidad de la precipitación
bio16	Precipitation of Westte Quarter / Precipitación del trimestre más húmedo
bio17	Precipitation of Driest Quarter / Precipitación del trimestre más seco
bio18	Precipitation of Warmest Quarter / Precipitación del trimestre más cálido
bio19	Precipitation of Coldest Month / Precipitación del trimestre más frío

8.5 W·m<sup>-2</sup>) emissions, and of both near (2015-2039) and far (2075-2099) future outlooks for each RCP (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, Conde-Álvarez, & Trejo-Vázquez, 2015b).

#### Soil properties data

Data on the soil properties were soluble cations (Ca, K, Mg, and Na; cmol·L<sup>-1</sup>), electric conductivity (dS·m<sup>-1</sup>), organic matter (%) and pH (Cruz-Cárdenas et al., 2014).

#### Selection of environmental predictors

The co-linearity of the 19 baseline variables was evaluated with a multinomial regression analysis. The multinomial model was adjusted through neural networks for the selection of variables (Venables & Ripley, 2002). The model with the selected variables and the model with the 19 variables were evaluated with the X<sup>2</sup> test. The group of variables with the best fit was utilized for species distribution modeling in future scenarios. The same variable selection technique was employed for the soil properties data.

#### Species distribution modeling

The species distribution models were generated using the Maxent software (version 3.3.3k) by Phillips,

corresponden a la base climatológica diaria (1960-2000) del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, & Romero-Centeno, 2015a). Respecto a las condiciones futuras, se utilizaron dos escenarios de forzamiento radiativo o trayectorias representativas de concentraciones (RCP, por sus siglas en inglés) de emisiones bajas (RCP 4.5 W·m<sup>-2</sup>) y altas (RCP 8.5 W·m<sup>-2</sup>), y de horizonte de futuro cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) para cada RCP (Fernández-Eguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, Conde-Álvarez, & Trejo-Vázquez, 2015b).

#### Datos de propiedades de suelos

Los datos de las propiedades de suelos fueron cationes solubles (Ca, K, Mg y Na; cmol·L<sup>-1</sup>), conductividad eléctrica (dS·m<sup>-1</sup>), materia orgánica (%) y pH (Cruz-Cárdenas et al., 2014).

#### Selección de predictores ambientales

La colinealidad de las 19 variables de la línea base se evaluó con un análisis de regresión multinomial. El modelo multinomial se ajustó vía redes neuronales para la selección de variables (Venables & Ripley, 2002). El modelo con las variables seleccionadas y el modelo con las 19 variables se evaluaron con

Anderson, and Schapire (2006). The purpose of Maxent is to estimate the target or unknown probability distribution through the probability distribution of maximum entropy (close to uniform), delimited by a set of restrictions that represent the incomplete information regarding the target distribution. The available information for the target distribution is shown as a group of variables or functions, and the restrictions are the expected values of each function, which must be equal to their sampling average (the sampling average for a group of sampled points is taken from the target distribution). When Maxent is utilized in modeling the species distribution using only occurrence records (occurrence of the 10 pines and two fir trees), the pixels of the area of study become space on which the probability distribution is delimited. In this case, the pixels with known species occurrence records constitute the sampling points, and the functions are the variables of climate, topography, and soils. About 75 % of the occurrence data was utilized for the training of the models and the remaining 25 % was used to validate them. The output grids of Maxent were categorized into three categories based on the average and the standard deviation of the logistical values (Cianfrani, Le Lay, Hirzel, & Loy, 2010). The unsuitable category consists in areas where the environmental requirements of the species are not satisfied; the marginal category consists in areas where the conditions of the habitat cannot permanently sustain the species; and the suitable category consists in areas with optimal environmental conditions in order to sustain the species presence (Ottaviani, Lasinio, & Boitani, 2004).

The future projections were made with the trained model parameters of each species, but it was specified by Maxent not to carry out the extrapolation due to there being problems in transferring the models (see details in Owens et al., 2013). The area under the curve was calculated in order to evaluate the accuracy of the models. The areas of the future scenario models were obtained through command lines, given that the graphic interface of Maxent does not allow for the calculation of these values for the projections.

## Results and discussion

The climate variables selected with multinomial regression were: maximum temperature of the warmest month (bio5), minimum temperature of the coldest month (bio6), annual temperature range (bio7), and precipitation of the driest quarter (bio17). Based on the  $X^2$  test, the Akaike information criterion for the model with 19 variables was not significantly different from the model with selected variables ( $P = 0.999$ ). In regard to the model with the seven soil variables and the model with the selected soil variables (pH and K), there was also no significant difference ( $P = 0.395$ ) between them. Therefore, in the species distribution modeling,

la prueba de  $X^2$ . El grupo de variables con mejor ajuste se empleó para el modelado de distribución de especies en escenarios futuros. La misma técnica de selección de variables se aplicó a los datos de propiedades de suelos.

## Modelado de distribución de especies

Los modelos de distribución de especies se generaron con el software Maxent (versión 3.3.3k) de Phillips, Anderson, y Schapire (2006). El propósito de Maxent es estimar la distribución de probabilidad objetivo o desconocida a través de la distribución de probabilidad de máxima entropía (cercana a la uniforme), delimitada por un conjunto de restricciones que representan información incompleta sobre la distribución objetivo. La información disponible de la distribución objetivo se presenta como un conjunto de variables o funciones, y las restricciones son los valores esperados de cada función que deben igualarse a su media muestral (la media muestral para un conjunto de puntos de muestreo se toman de la distribución objetivo). Cuando Maxent se emplea para modelar la distribución de especies utilizando sólo registros de presencia (presencias de los 10 pinos y dos abetos), los píxeles del área de estudio se convierten en el espacio sobre el cual la probabilidad de distribución se delimita. Para este caso, los píxeles con registro de ocurrencias de especies conocidas constituyen los puntos de muestreo, y las funciones son las variables de clima, topografía y suelos. Se empleó 75 % de los datos de presencia para el entrenamiento de los modelos y 25 % restante para validarlos. Los *grids* de salida de Maxent se catalogaron en tres clases con base en la media y la desviación estándar de los valores logísticos (Cianfrani, Le Lay, Hirzel, & Loy, 2010). La clase no idónea son áreas donde los requerimientos ambientales de las especies no se satisfacen; la clase marginal son áreas donde las condiciones del hábitat no pueden soportar a las especies en forma permanente; y la clase idónea son áreas con las condiciones ambientales óptimas para soportar la presencia de las especies (Ottaviani, Lasinio, & Boitani, 2004).

Las proyecciones futuras se hicieron con parámetros de modelos entrenados de cada especie, pero se indicó a Maxent que no realizara la extrapolación, debido a que se tienen problemas para transferir los modelos (ver detalle en Owens et al., 2013). El área bajo la curva se calculó para evaluar la precisión de los modelos. Las áreas de los modelos de escenarios futuros se obtuvieron por medio de líneas de comando, pues la interfaz gráfica de Maxent no permite calcular estos valores para las proyecciones.

## Resultados y discusión

Las variables de clima seleccionadas con la regresión multinomial fueron temperatura máxima del mes

**Table 2. Values of the area under the curve of the distribution models of 12 species of Pinaceae in the state of Michoacán, under different scenarios and periods.****Cuadro 2. Valores del área bajo de la curva de los modelos de distribución de 12 especies de Pinaceae en el estado de Michoacán, bajo escenarios y periodos diferentes.**

Species/Especie	Baseline	RCP45	RCP45	RCP85	RCP85	Variation
	(1960-2000)/ Línea base (1960-2000)	2015-2039	2075-2099	2015-2039	2075-2099	Coefficient (%)/ Coeficiente de variación (%)
<i>Abies guatemalensis</i> Rehd.	0.445	0.463	0.482	0.462	0.520	6.0
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	0.921	0.913	0.900	0.914	0.900	1.0
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	0.887	0.887	0.918	0.895	0.904	1.5
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.997	0.999	0.998	0.997	0.998	0.1
<i>Pinus lawsonii</i> Roezl ex Gordon	0.854	0.851	0.865	0.859	0.839	1.1
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schlttdl. & Cham.	0.993	0.917	0.909	0.926	0.908	3.8
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	0.857	0.842	0.848	0.847	0.808	2.2
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	0.810	0.808	0.801	0.807	0.807	0.4
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlttdl.	0.577	0.620	0.716	0.548	0.769	14.5
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	0.997	0.984	0.981	0.979	0.979	0.8
<i>Pinus rzedowskii</i> Madrigal & M. Caball.	0.994	0.995	0.994	0.994	0.994	0.0
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schlttdl. & Cham.	0.671	0.745	0.744	0.763	0.710	5.0

RCP: Scenarios of radiative forcing or representative concentration pathways of low (RCP 4.5 W·m<sup>-2</sup>) and high (RCP 8.5 W·m<sup>-2</sup>) emissions, and of a close (2015-2039) and far (2075-2099) future outlook.

RCP: Escenarios de forzamiento radiativo o trayectorias representativas de concentraciones (por sus siglas en inglés) de emisiones bajas (RCP 4.5 W·m<sup>-2</sup>) y altas (RCP 8.5 W·m<sup>-2</sup>), y de horizonte de futuro cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099).

four climate variables, two soil variables, and the digital elevation model were utilized. The importance of variable selection lies in reducing the co-linearity and thus preventing the risk of over adjusting the models. The selected climate variables in the temperature and precipitation groups are in accordance with what was proposed by Barbet-Massin and Jetz (2014), with which models consistent in space and time are generated, mainly with the variables in the temperature group.

Table 2 shows the values of the area under the curve of the species distribution models. In general, the values of the area in all the scenarios are greater than 0.80, except for *A. guatemalensis*, *P. oocarpa*, and *P. teocote*. Baldwin (2009) mentions that the values of the area under the curve less than 0.7 are considered bad predictive models, values of 0.7 to 0.9 are good models, and values greater than 0.9 are extremely good models. Therefore, 85 % of the distribution models for the pine and fir tree species are considered good (40 %) and extremely good (45 %). Furthermore, the values of the area did not significantly decrease with time and showed a variation coefficient less than 6 % in the majority of cases. The models with low predictive power mainly correspond to those with occurrence localities less than 5, such as *A. guatemalensis* and *P. oocarpa*.

Table 3 shows the contribution percentage of the variables or environmental predictors in each species distribution model. The environmental predictors with greater weight were maximum temperature of the

más cálido (bio5), temperatura mínima del mes más frío (bio6), rango anual de la temperatura (bio7) y precipitación del trimestre más seco (bio17). Con base en la prueba de X<sup>2</sup>, el criterio de información de Akaike del modelo con 19 variables no fue significativamente diferente del modelo con las variables seleccionadas ( $P = 0.999$ ). En cuanto al modelo con las siete variables de suelo y el modelo con las variables de suelo seleccionadas (pH y K) tampoco hubo diferencia significativa ( $P = 0.395$ ) entre ellos. Por tanto, en el modelado de la distribución de especies se emplearon cuatro variables de clima, dos de suelo y el modelo digital de elevación. La importancia de la selección de variables radica en reducir la colinealidad y con esto evitar el riesgo de sobreajuste de los modelos. Las variables de clima seleccionadas se encuentran en el grupo de temperatura y precipitación de acuerdo con lo propuesto por Barbet-Massin y Jetz (2014), con las cuales se generan modelos consistentes en espacio y tiempo, principalmente con las variables del grupo de temperatura.

El Cuadro 2 reporta los valores del área bajo la curva de los modelos de distribución de especies. En general, los valores del área en todos los escenarios son mayores de 0.80, excepto para *A. guatemalensis*, *P. oocarpa* y *P. teocote*. Baldwin (2009) menciona que valores del área bajo la curva menores de 0.7 se consideran modelos predictivos malos, valores de 0.7 a 0.9 son modelos buenos, y valores mayores de 0.9 son modelos muy buenos. Por lo tanto,

**Table 3. Contribution of the environmental predictors on the distribution models of 12 species of Pinaceae in Michoacán.****Cuadro 3. Contribución de los predictores ambientales en los modelos de distribución de 12 especies de Pinaceae en Michoacán.**

Species / Especie	Contribution on the distribution models (%) Contribución en los modelos de distribución (%)							Total
	bio5	bio6	bio7	bio17	K	pH	DEM	
<i>Abies guatemalensis</i> Rehd.					80.0	20.0		100.0
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	2.2	81.9	0.7	1.4	13.4		0.4	100.0
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	4.9	92.3		0.1	2.7			100.0
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	55.5	44.5						100.0
<i>Pinus lawsonii</i> Roetzl ex Gordon	1.0	76.7	2.1	0.1		20.1		100.0
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	59.2	7.2	1.8	15.3	0.3	14.9	1.3	100.0
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	26.8	5.4	10.3	5.5	1.0	14.3	36.7	100.0
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	9.3	36.5		0.3	2.1	2.9	48.9	100.0
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	36.2			11.0		44.5	8.3	100.0
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.		92.4			0.1	6.0	1.5	100.0
<i>Pinus rzedowskii</i> Madrigal & M. Caball.	45.7			8.6	21.8	23.5	0.4	100.0
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.		92.3			7.7			100.0

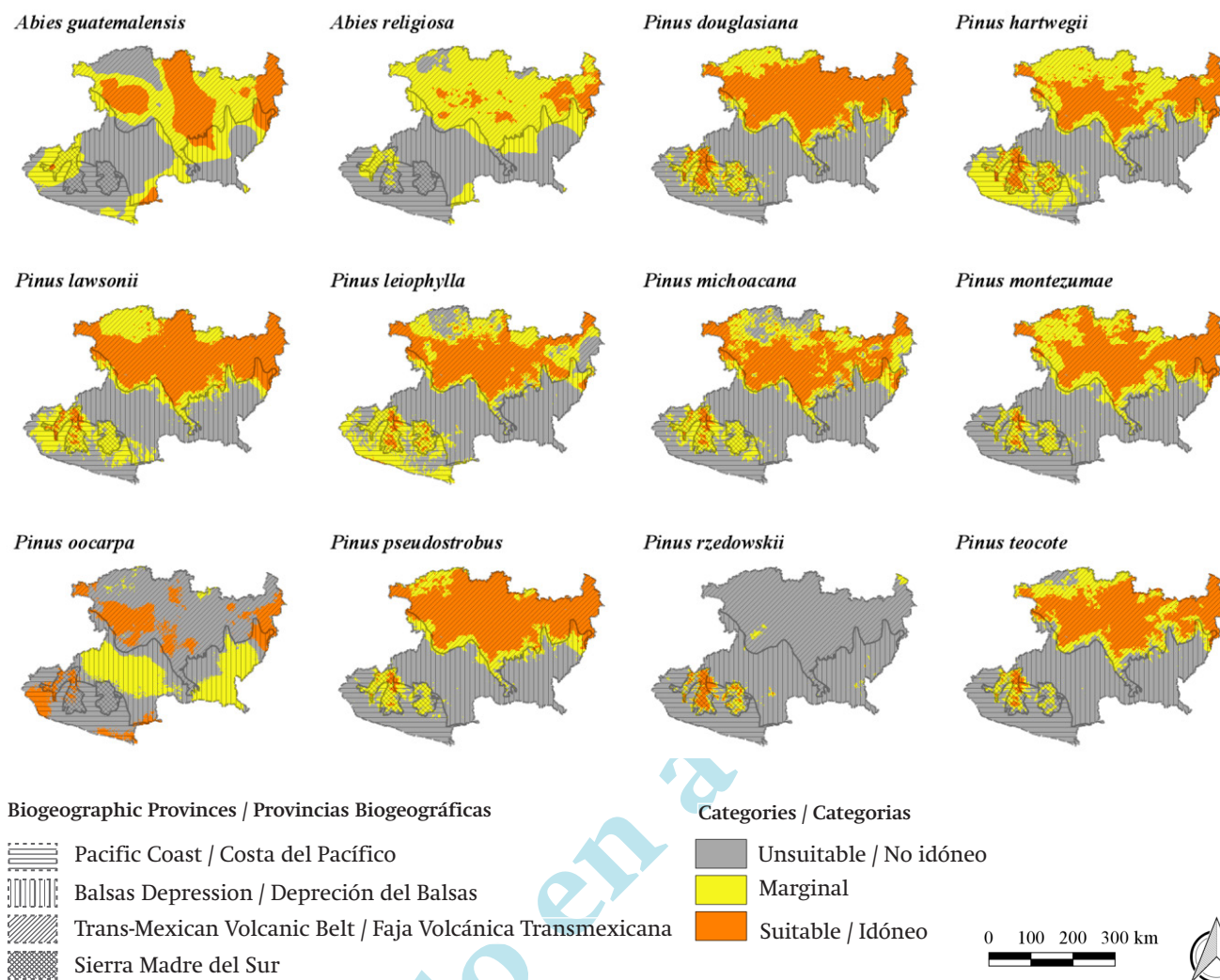
Bio5 = Maximum temperature of the warmest month, bio6 = Minimum temperature of the coldest month, bio7 = Temperature annual range, bio17 = Precipitation of the driest month. DEM: Digital elevation model.

Bio5 = Temperatura máxima del mes más cálido, bio6 = Temperatura mínima del mes más frío, bio7 = Rango anual de la temperatura, bio17 = Precipitación del trimestre más seco. MDE: Modelo digital de elevación.

**Table 4. Rate of change of the surface of the ideal areas of 12 species of Pinaceae in Michoacán, with regard to the baseline (1960-2000).****Cuadro 4. Tasa de cambio de la superficie de áreas idóneas de 12 especies de Pinaceae en Michoacán, con respecto a la línea base (1960-2000).**

Species / Especie	Baseline / Línea base	Rate of change (%) / Tasa de cambio (%)	
		Close outlook (2015-2039) / Horizonte cercano (2015-2039)	Far outlook (2075-2099) / Horizonte lejano (2075-2099)
<i>Abies guatemalensis</i> Rehd.	22.23	3.01	-0.25
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.	6.83	-54.54	-89.90
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez	36.84	-24.33	-57.11
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	25.96	-38.27	-75.94
<i>Pinus lawsonii</i> Roetzl ex Gordon	37.86	-11.11	-32.71
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	25.69	-47.74	-72.56
<i>Pinus michoacana</i> Martínez	27.92	-38.63	-71.81
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	30.79	6.15	4.55
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl.	18.32	81.03	18.29
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	38.46	-10.97	-37.95
<i>Pinus rzedowskii</i> Madrigal & M. Caball.	2.4	-4.38	10.21
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	29.93	-41.80	-68.08





**Figure 2. Potential distribution maps for species of pines and fir in the baseline (1960-2000) of study in Michoacán.**  
**Figure 2. Mapas de la distribución potencial de especies de pinos y abetos en la línea base (1960-2000) de estudio en Michoacán.**

warmest month (bio5), minimum temperature of the coldest month (bio6), and pH.

The distribution potential of the 10 pines and two fir trees in the baseline is shown in Figure 2. According to the figure, the suitable area for the distribution of the majority of the species is within the biogeographic provinces of the Trans-Mexican Volcanic Belt and Sierra Madre del Sur; whereas the biogeographic provinces of the Balsas Depression and Pacific Coast are areas where the environmental requirements for the species are not satisfied. Table 4 shows the rate of change of the surface of the suitable area for the 10 pines and two fir trees in future scenarios with regard to the baseline. More than 30 % of the surface area of the state shows ideal conditions for the distribution of *P. douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. montezumae*, and *P. pseudostrobus*. On the other hand, less than 7 % of the surface area of the state is considered ideal for the distribution of *A. religiosa* and *P. rzedowskii*. The close outlook predictions show a change

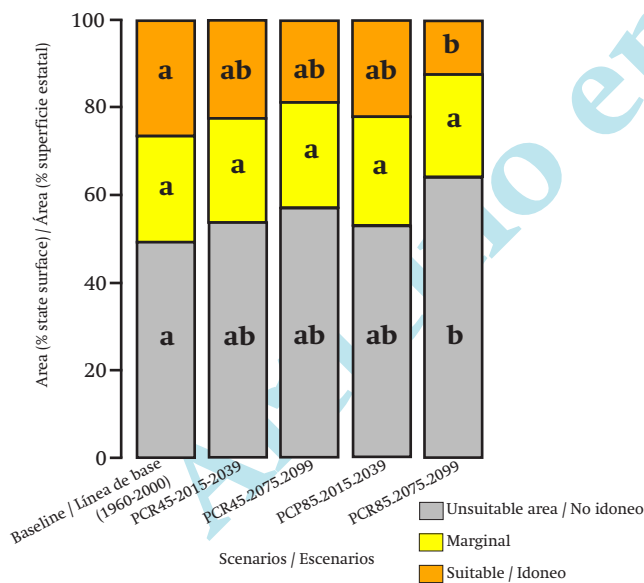
85 % de los modelos de distribución de las especies de pinos y abetos se consideran buenos (40 %) y muy buenos (45 %). Además, los valores de del área no disminuyeron significativamente en el tiempo y presentaron un coeficiente de variación menor de 6 % en la mayoría de los casos. Los modelos con poder predictivo bajo corresponden principalmente a aquellos con localidades de presencia menores de 5 como *A. guatemalensis* y *P. oocarpa*.

El Cuadro 3 muestra el porcentaje de contribución de las variables o predictores ambientales en cada modelo de distribución de especies. Los predictores ambientales con mayor peso fueron temperatura máxima del mes más cálido (bio5), mínima del mes más frío (bio6) y pH.

La distribución potencial de los 10 pinos y dos abetos en la línea base se presenta en la Figura 2. Acorde con la figura, las áreas idóneas para la

in the ideal areas for the presence of the studied species. In this outlook, the distribution area of *P. oocarpa* will increase 81 %, whereas the suitable area of *A. religiosa*, *P. leiophylla*, and *P. teocote* will decrease by more than 40 %. The predictions for the far outlook also show that there will be a reduction in the ideal areas. The ideal areas of *A. religiosa*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. michoacana*, and *P. teocote* will decrease by more than 60 %. On the other hand, the ideal distribution area for *P. oocarpa* and *P. rzedowskii* will increase by 18 and 10 %, respectively.

According to Figure 3, the unsuitable area will increase in the periods and future scenarios with regard to the baseline climate; the increase will cause the decrease of the ideal areas. The decrease of ideal area between the future climate scenarios and the baseline was not significant ( $P = 0.103$ ), with the exception of the scenario RCP 8.5 and outlook 2075-2099. In general, the species distribution models of the scenario of high emissions (RCP 8.5  $W \cdot m^{-2}$ ) will show a greater reduction of suitable area in comparison with the scenario of low emissions (RCP 4.5  $W \cdot m^{-2}$ ), as indicated by Fernández-Eguiarte et al. (2015b). Similar results will be slightly lower in conservative scenarios (Gómez-Mendoza & Arriaga, 2007; Hamann & Wang, 2006).



**Figure 3. Means comparison of the potential distribution area of 12 species of Pinaceae in different periods and scenarios of Michoacán. Different letters in the rows are significantly different in accordance with the Tukey test ( $P = 0.05$ ).**

**Figura 3. Comparación de medias del área de distribución potencial de 12 especies de Pinaceae en diferentes periodos y escenarios de Michoacán. Letras diferentes en filas son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P = 0.05$ ).**

distribución de la mayoría de las especies se encuentran en las provincias biogeográficas Faja Volcánica Transmexicana y Sierra Madre del Sur; en cambio, las provincias biogeográficas de la Depresión del Balsas y Costa del Pacífico son áreas donde los requerimientos ambientales para las especies no se satisfacen. El Cuadro 4 presenta la tasa de cambio de la superficie de áreas idóneas de los 10 pinos y dos abetos en escenarios futuros con respecto a la línea base. Más del 30 % de la superficie del estado presenta las condiciones idóneas para la distribución de *P. douglasiana*, *P. lawsonii*, *P. montezumae* y *P. pseudostrobus*. En cambio menos del 7 % del área estatal se considera idónea para la distribución de *A. religiosa* y *P. rzedowskii*. Las predicciones para el horizonte cercano muestran un cambio de las áreas idóneas para la presencia de las especies estudiadas. Bajo este horizonte, el área de distribución de *P. oocarpa* aumentará 81 %. En cambio, el área idónea de *A. religiosa*, *P. leiophylla* y *P. teocote* disminuirá más de 40 %. Los pronósticos para el horizonte lejano muestran que también se presentará la reducción de áreas idóneas. Las superficies idóneas de *A. religiosa*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. michoacana* y *P. teocote* disminuirán más de 60 %. En contraste, el área de distribución idónea para *P. oocarpa* y *P. rzedowskii* aumentará 18 y 10 %, respectivamente.

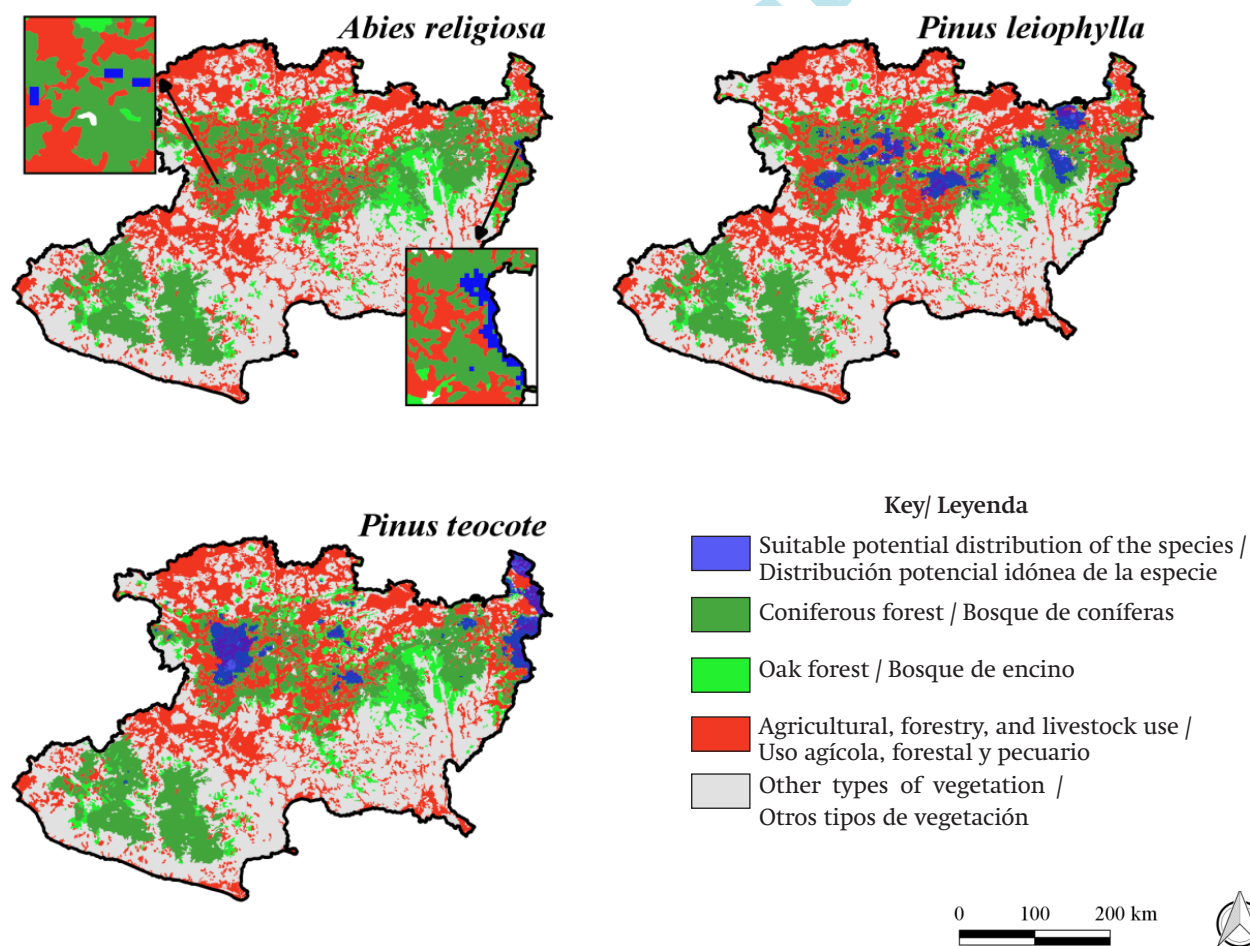
De acuerdo con la Figura 3, las áreas no idóneas aumentarán en los periodos y escenarios futuros con respecto al clima de línea base; el incremento provocará la disminución de las áreas idóneas. La reducción del área idónea entre los escenarios de clima futuro y línea base no fue significativa ( $P = 0.103$ ), a excepción del escenario RCP 8.5 y el horizonte 2075-2099. En general, los modelos de distribución de especies del escenario de emisiones altas (RCP 8.5  $W \cdot m^{-2}$ ) presentarán mayor reducción de áreas idóneas en comparación con los escenarios de emisiones bajas (RCP 4.5  $W \cdot m^{-2}$ ), tal como lo indican Fernández-Eguiarte et al. (2015b). Resultados similares se han reportado en estudios previos donde se estima que las áreas ideales serán ligeramente menores en los escenarios conservadores (Gómez-Mendoza & Arriaga, 2007; Hamann & Wang, 2006).

La estimación de la disminución de áreas idóneas para la presencia de *A. religiosa* es similar a lo encontrado por Sáenz-Romero et al. (2012), quienes reportan que el área se reducirá más de 88 % en periodos posteriores al año 2050. Los autores mencionan que una de las soluciones para reducir el impacto del cambio climático sobre la distribución de esta especie es el manejo asistido, ubicando nuevas localidades 300 m arriba de las cotas altitudinales actuales; sin embargo, esto no garantiza que las especies que coexisten (mariposa monarca y hongos comestibles) con *A. religiosa*, se adapten a los nuevos sitios.

The estimation of the decrease of the suitable areas for the presence of *A. religiosa* is similar to what was found by Sáenz-Romero et al. (2012), who reported that the area will be reduced by more than 88% in periods subsequent to the year 2050. The authors mention that one of the solutions to reduce the impact of climate change on the species distribution is assisted management, locating new localities 300 m above the current altitudinal benchmarks; however, this does not guarantee that the species that coexist (monarch butterfly and edible mushrooms) with *A. religiosa* will adapt to the new sites.

Due to the increase in temperature and the decrease in precipitation because of climate change, the distribution area of various *Pinus* species could decrease in areas with altitudes above 3,500 m and it will be necessary to transfer lower altitude species (3,000-3,500 m) to these altitudinal heights (Viveros-Viveros et al., 2009). Gómez-Mendoza and Arriaga (2007) found

Debido al aumento de temperatura y la reducción de la precipitación por cambio climático, el área de distribución de varias especies de *Pinus* puede disminuir en zonas con altitud mayor de 3,500 m y será necesario transferir especies de menor altitud (3,000-3,500 m) a estas cotas altitudinales (Viveros-Viveros et al., 2009). Gómez-Mendoza y Arriaga (2007) encontraron que *P. oocarpa* es una de las especies más vulnerables al cambio climático en la república mexicana. Según estos autores, el área idónea de *P. oocarpa* se reducirá 50 %; *P. teocote* es una especie moderadamente sensible al cambio climático, ya que su superficie se contraerá 19 %; mientras que *P. douglasiana* es una especie tolerante porque su superficie de distribución disminuirá solo 1 %. Por otra parte, *P. leiophylla* debe ser estudiada de manera especial, ya que su distribución no solo es vulnerable al cambio climático sino también a plagas como *Dendroctonus*, categorizada como una amenaza alta en zonas de la Faja Volcánica Transmexicana (Salinas-Moreno, Ager, Vargas, Hayes, & Zúñiga, 2010).



**Figure 4. Suitable potential distribution of the species that will be most affected by climate change, under the RCP 8.5 2075-2099 scenario. Soil use and vegetation change polygons in accordance with the INEGI (2005).**

**Figura 4. Distribución potencial idónea de las especies que serán más afectadas por el cambio climático, bajo el escenario RCP 8.5 2075-2099. Polígonos de cambio de uso de suelo y vegetación de acuerdo con INEGI (2005).**

that *P. oocarpa* is one of the species most vulnerable to climate change in the Mexican republic. According to these authors, the ideal area for *P. oocarpa* will decrease by 50 %; *P. teocote* is a species moderately sensitive to climate change, given that its surface area will decrease by 19 %; whereas *P. douglasiana* is a tolerant species, given that its distribution surface area will only decrease by 1 %. On the other hand, *P. leiophylla* must be closely studied given that its distribution is not only vulnerable to climate change, but also to some plagues such as *Dendroctonus*, categorized as a high threat in areas of the Trans-Mexican Volcanic Belt (Salinas-Moreno, Ager, Vargas, Hayes, & Zúñiga, 2010).

The three species that will be most affected by climate change, according to the close and far outlooks, are *A. religiosa*, *P. leiophylla*, and *P. teocote*. These species relate to communities of coniferous and oak forests, whose surfaces could also be affected by the change in soil use due to agricultural, forestry, and livestock activities (Figure 4); therefore, it is estimated that there will be a greater decrease in suitable potential distribution. This is the case with *A. guatemalensis*, given that the soils where it is commonly found are fertile, an important factor in the establishment of other plantations (Andersen, Córdova, Sørensen, & Kollmann, 2006). Nevertheless, Jantz et al. (2015) mention that the suitable potential distribution decreased from the year 1500 to 2005, where more than half of the natural vegetation was lost due to such activities. These authors estimate that for future RCP scenarios, more than 70 % of the natural vegetation will be lost due to logging.

## Conclusions

Of the 27 climate, soil, and topography variables, only seven were utilized (maximum temperature of the warmest month, minimum temperature of the coldest month, annual temperature range, precipitation of the driest quarter, K, pH, and the digital elevation model) with greater significance on the species distribution modeling. The variables generated robust models in time and space, given that 85 % were considered good and extremely good in accordance with the values of the area under the curve. The potential species distribution models in function of the RCP 8.5 scenarios showed the greatest decrease of suitable distribution areas for pines and oaks. The species most affected by climate change will be *A. religiosa*, *P. leiophylla*, and *P. teocote*. Therefore, it is necessary to implement measures to adapt to climate change through assisted management, genetic variation, and plague resistance. The decrease of the ideal areas for the distribution of *A. religiosa* will be greater than 72 %, being the most affected of the evaluated species; if its population decreases, it will also affect the population of the monarch butterfly and the economy of the neighboring inhabitants who depend on the tourism attracted by the presence of the lepidoptera.

*End of English Version*

Las tres especies que serán más afectadas por el cambio climático, de acuerdo con los horizontes cercano y lejano, son *A. religiosa*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. Estas especies se relacionan con comunidades de bosque de coníferas y bosque de encinos, cuyas superficies también pueden ser afectadas por el cambio de uso de suelo debido a las actividades agrícolas, forestales y pecuarias (Figura 4), por tal motivo se estima que exista mayor reducción de la distribución potencial idónea. Esto sucede con *A. guatemalensis*, ya que los suelos donde comúnmente se encuentra son fértiles, factor importante en el establecimiento de otras plantaciones (Andersen, Córdova, Sørensen, & Kollmann, 2006). Sin embargo, Jantz et al. (2015) mencionan que la distribución potencial idónea se redujo del año 1500 a 2005, donde más de la mitad de la vegetación natural se perdió por dichas actividades. Estos autores valoran que, para escenarios futuros de RCP, más de 70 % de la vegetación natural se perderá por la tala.

## Conclusiones

De las 27 variables de clima, suelo y topografía solo se emplearon siete (temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, rango anual de la temperatura, precipitación del trimestre más seco, K, pH y el modelo digital de elevación) con mayor significancia en el modelado de distribución de especies. Las variables generaron modelos robustos en tiempo y espacio, pues 85 % se consideraron buenos y muy buenos de acuerdo con los valores de área bajo la curva. Los modelos de distribución potencial de especies en función de los escenarios RCP 8.5 presentaron la mayor disminución de la distribución de áreas idóneas de pinos y abetos. Las especies más afectadas por el cambio climático serán *A. religiosa*, *P. leiophylla* y *P. teocote*. Por tanto, es necesario implementar medidas para la adaptación al cambio climático a través de manejo asistido, variabilidad genética y resistencia a plagas. La reducción de las áreas idóneas para la distribución de *A. religiosa* será mayor de 72 %, siendo la más afectada de las especies evaluadas; si su población disminuye, también afectará la población de mariposa monarca y la economía de los habitantes aledaños que dependen del turismo atraído por la presencia del lepidóptero.

*Fin de la versión en español*

## References / Referencias

- Andersen, U. S., Córdova, J. P. P., Sørensen, M., & Kollmann, J. (2006). Conservation and utilisation of *Abies guatemalensis* Rehder (Pinaceae)—an endangered endemic conifer in Central America. *Biodiversity & Conservation*, 15(10), 3131–3151. doi: 10.1007/s10531-005-5405-x
- Anderson, R. P., & Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic

- distributions and estimates of niche evolution: Preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37(7), 1378–1393. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x
- Baldwin, R. A. (2009). Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*, 11(4), 854–866. doi: 10.3390/e11040854
- Barbet-Massin, M., & Jetz, W. (2014). A 40-year, continent-wide, multispecies assessment of relevant climate predictors for species distribution modelling. *Diversity and Distributions*, 20(11), 1285–1295. doi: 10.1111/ddi.12229
- Cianfrani, C., Le Lay, G., Hirzel, A. H., & Loy, A. (2010). Do habitat suitability models reliably predict the recovery areas of threatened species? *Journal of Applied Ecology*, 47(2), 421–430. doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01781.x
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Ortiz-Solorio, C. A., Villaseñor, J. L., Ortiz, E., Silva, J. T., & Estrada-Godoy, F. (2014). Interpolation of Mexican soil properties at a scale of 1:1,000,000. *Geoderma*, 213, 29–35. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.07.014
- Cué-Bár, E. M., Villaseñor, J. L., Arredondo-Amezcuca, L., Cornejo-Tenorio, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2006). La flora arbórea de Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 78, 47–81. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/577/57707806.pdf?viewTy pe=Print&viewClass=Print>
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., & Romero-Centeno, R. (2015a). Atlas climático digital de México. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A. C., & Trejo-Vázquez, R. I. (2015b). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>
- García, E. (1990). *Atlas nacional de México. Carta de climas (1: 1 400 000)*. México, D. F.: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez-Mendoza, L., & Arriaga, L. (2007). Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), 1545–1555. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x
- Gutiérrez, J. A., & Duivenvoorden, J. F. (2010). Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 81(3), 875–882. Obtenido de <http://scielo.unam.mx/pdf/rmbiodiv/v81n3/v81n3a27.pdf>
- Hamann, A., & Wang, T. (2006). Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology*, 87(11), 2773–2786. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2773:PEOCCO]2.0.CO;2
- Hamrick, J. L. (2004). Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management*, 197(1), 323–335. doi:10.1016/j.foreco.2004.05.023
- Hijmans, R. J., Cruz, M. E., & Guarino, L. (2012). DIVA-GIS versión 7.5. Free mapping program. CA, USA: LizardTech, Inc. Obtenido de <http://www.diva-gis.org/>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1988). *Atlas nacional de medio físico*. Aguascalientes, México. Autor: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). *Mapa de uso de suelo y vegetación 1:250 000 Serie III*. México. Autor: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
- Jantz, S. M., Barker, B., Brooks, T. M., Chini, L. P., Huang, Q., Moore, R. M., ...Hurttt, G. C. (2015). Future habitat loss and extinctions driven by land-use change in biodiversity hotspots under four scenarios of climate-change mitigation. *Conservation Biology*, 29(4), 1122–1131. doi: 10.1111/cobi.12549
- Jeschke, J. M., & Strayer, D. L. (2008). Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 1–24. doi: 10.1196/annals.1439.002
- Martínez-Meyer, E. (2005). Climate change and biodiversity: Some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics*, 2, 45–55. doi: 10.17161/bi.v2i0.8
- Meléndez, V. (2010). Valor económico de la biodiversidad. En R. Durán, & M. Méndez (Eds.), *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 453–456). Mérida, Yucatán, México: CICY-PPD-FMAM-Conabio-Seduma.
- Ottaviani, D., Lasinio, G. J., & Boitani, L. (2004). Two statistical methods to validate habitat suitability models using presence-only data. *Ecological Modelling*, 179(4), 417–443. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.05.016
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J. ...Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10–18. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011
- Peterson, A. T. (2006). Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodiversity Informatics*, 3, 59–72. doi: 10.17161/bi.v3i0.29
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3), 231–259. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Real, R., Luz Márquez, A., Olivero, J., & Estrada, A. (2010). Species distribution models in climate change scenarios are still not useful for informing policy planning: An uncertainty assessment using fuzzy logic. *Ecography*, 33(2), 304–314. doi: 10.1111/j.1600-0587.2010.06251.x
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98–106. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.004

- 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(1), 52–61. doi:10.1016/j.foreco.2010.03.029
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern applied statistics with S*. New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Villaseñor, J. L. (2003). Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México. *Interciencia*, 28(3), 160–167. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33907806>
- Villaseñor, G. L. E. (2005). *La biodiversidad en Michoacan: Estudio de estado*. México, D. F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Obtenido de <http://repositorio.fcencias.unam.mx:8080/xmlui/handle/11154/62925>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836–842. doi:10.1016/j.foreco.2008.10.021

Artículo en avanzada