

Climate change and impact on distribution of tree species in the cloud forest of Oaxaca

Cambio climático y su efecto sobre la distribución de especies arbóreas del bosque mesófilo de montaña de Oaxaca

Sandra Altamirano-León¹; Julio C. Ramírez-Martínez²; Daniel F. Díaz-Porras¹; Ricardo Balam-Narváez¹; Isolda Luna-Vega²; Raúl Contreras-Medina^{1*}

¹Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO), Escuela de Ciencias, Laboratorio de Biodiversidad. Av. Universidad s/n, Cinco Señores. C. P. 68120. Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México.

²Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ciencias, Departamento de Biología Evolutiva, Laboratorio de Biogeografía y Sistemática. Ciudad Universitaria. C. P. 04510. Coyoacán, Ciudad de México, México.

*Corresponding author: raconmed@gmail.com; tel.: +52 951 144 8056.

Abstract

Introduction: Climate change represents a problem that generates long-term impacts and is considered a threat to the conservation of many species.

Objective: To evaluate the impact of climate change on the distribution areas of 10 trees species characteristic of cloud forests in the state of Oaxaca.

Materials and methods: The impact was evaluated for two-time horizons (2050 and 2080) and two emission scenarios (RCP 4.5 and 8.5) under the Had GEM2-ES general atmospheric circulation model. Current and future distribution was modeled with MaxEnt. The distribution of *Carpinus tropicalis*, *Juglans pyriformis*, *Liquidambar styraciflua*, *Litsea glaucescens*, *Magnolia dealbata*, *Magnolia schiedeana*, *Ostrya virginiana*, *Symplocos coccinea*, *Zinowiewia concinna* and *Taxus globosa* were obtained from the herbarium specimen review.

Results and discussion: In RCP 4.5, *J. pyriformis*, *L. styraciflua*, *L. glaucescens* and *S. coccinea* increased (2.8 % to 20.5 %) their area of distribution. In this scenario, the rest of the species reduced their area by up to 30 % compared to the current distribution. In RCP 8.5-2050, *J. pyriformis* and *O. virginiana* had a gain of more than 5 %. All species showed a reduction greater than 10 % under the RCP 8.5-2080 scenario. The models showed area under the curve greater than 0.8 and partial ROC (Receiver Operating Characteristic) greater than 1.7.

Conclusions: Understanding the response of 10 species to climate change will serve as a basis for proposing conservation and monitoring plans, since nine of them are in some category of risk.

Keywords: MaxEnt; *Juglans pyriformis*; *Ostrya virginiana*; threatened species; emission scenarios; time horizons.

Resumen

Introducción: El cambio climático representa un problema que genera impactos a largo plazo y se considera una amenaza para la conservación de muchas especies.

Objetivo: Evaluar el impacto del cambio climático sobre las áreas distribución de 10 especies arbóreas características del bosque mesófilo de montaña en el estado de Oaxaca.

Materiales y métodos: El impacto se evaluó para dos horizontes de tiempo (2050 y 2080) y dos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y 8.5) bajo el modelo general de circulación atmosférica HadGEM2-ES. La distribución actual y futura se modeló con MaxEnt. La distribución de *Carpinus tropicalis*, *Juglans pyriformis*, *Liquidambar styraciflua*, *Litsea glaucescens*, *Magnolia dealbata*, *Magnolia schiedeana*, *Ostrya virginiana*, *Symplocos coccinea*, *Zinowiewia concinna* y *Taxus globosa* se obtuvieron a partir de la revisión de ejemplares en herbarios.

Resultados y discusión: En el RCP 4.5, *J. pyriformis*, *L. styraciflua*, *L. glaucescens* y *S. coccinea* aumentaron (2.8 % a 20.5 %) su área de distribución. En este escenario, el resto de las especies redujeron su área hasta en 30 % con respecto a la distribución actual. En el RCP 8.5-2050, *J. pyriformis* y *O. virginiana* tuvieron una ganancia mayor de 5 %. Todas las especies mostraron reducción mayor de 10 % bajo el escenario RCP 8.5-2080. Los modelos presentaron área bajo la curva mayor de 0.8 y ROC (Receiver Operating Characteristic) parcial mayor de 1.7.

Conclusiones: El conocimiento de la respuesta de las 10 especies ante el cambio climático servirá de base para proponer planes de conservación y monitoreo, considerando que nueve se encuentran en alguna categoría de riesgo.

Palabras clave: MaxEnt, *Juglans pyriformis*; *Ostrya virginiana*; especies amenazadas; escenarios de emisión; horizontes de tiempo.

Introduction

Climate change is causing problems in the environment as a consequence of complex interactions between climate and ecology, and with social, economic and political processes; it is predicted that these problems will become more severe (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2004). This change is considered a threat to the conservation of many plants and animals; 50 % of vascular plant species are at risk of extinction as a result of such phenomenon (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014).

Global climate change is expected to reduce the distribution of several species (Alfonso-Corrado et al., 2017; Manzanilla-Quijada, Treviño-Garza, Aguirre-Calderón, Yereña-Yamallel, & Manzanilla-Quiñones, 2020; Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Tinoco-Rueda, 2013), particularly terrestrial species (Ponce-Reyes et al., 2012). Many of them will become extinct (Alfonso-Corrado et al., 2017) and others will decrease their populations (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003); however, new climatic conditions are expected to stimulate the ability of certain species to migrate and adapt to emerging environmental conditions (Gray, 2005; IPCC, 2014).

Species distribution models are a useful tool for assessing the potential impact of climate change. These models detect changes by comparing their current potential distribution areas with their potential distribution areas under future climatic conditions (Peterson et al., 2011).

Mexican temperate forests are included among the ecosystems with the greatest negative impact of climate change (Gual-Díaz & González-Medrano, 2014; Gutiérrez & Trejo, 2014; Ponce-Reyes et al., 2012; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013). Among temperate forests, the cloud forest (CF) is considered the type of vegetation that hosts the greatest diversity of species, both flora and fauna, in relation to its area (González-Espinosa, Meave, Lorea-Hernández, Ibarra-Manríquez, & Newton, 2011; Gual-Díaz & González-Medrano, 2014; Luna-Vega, Alcántara, Contreras-Medina, & Vargas, 2006; Rzedowski, 2006). It is estimated that CF is the habitat of more than 6790 species of vascular plants, of which about 35 % are endemic (Luna-Vega & Magallón, 2010). The area covered by CF does not exceed 1 % of the national territory (Sánchez-Ramos & Dirzo, 2014). In Mexico has been reported the presence of CF in just over 100 localities distributed in the form of an archipelago with different size, from a few hectares to tens of thousands of hectares (González-Espinosa et al., 2011). This fragmented distribution is limited to mountainous areas with abrupt topography, in particular ravines and areas protected from solar

Introducción

El cambio climático está generando problemas en el medio ambiente como consecuencia de interacciones complejas entre el clima y la ecología, así como con procesos sociales, económicos y políticos; se predice que estos problemas se agudizarán (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2004). Este cambio se considera una amenaza para la conservación de muchas plantas y animales; 50 % de las especies de plantas vasculares están en peligro de extinción como resultado de dicho fenómeno (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014).

Se anticipa que el cambio climático global reducirá las áreas de distribución de diversas especies (Alfonso-Corrado et al., 2017; Manzanilla-Quijada, Treviño-Garza, Aguirre-Calderón, Yereña-Yamallel, & Manzanilla-Quiñones, 2020; Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Tinoco-Rueda, 2013), particularmente de las terrestres (Ponce-Reyes et al., 2012). Muchas de ellas se extinguirán (Alfonso-Corrado et al., 2017) y otras disminuirán sus poblaciones (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003); sin embargo, se espera que las nuevas condiciones climáticas estimulen la habilidad de ciertas especies para migrar y adaptarse a las condiciones ambientales emergentes (Gray, 2005; IPCC, 2014).

Los modelos de distribución de especies son una herramienta útil para la evaluación del impacto potencial del cambio climático. Estos modelos detectan cambios mediante la comparación de sus áreas de distribución potencial actual con las de distribución potencial en condiciones climáticas futuras (Peterson et al., 2011).

Los bosques templados de México se encuentran dentro de los ecosistemas con mayor impacto negativo del cambio climático (Gual-Díaz & González-Medrano, 2014; Gutiérrez & Trejo, 2014; Ponce-Reyes et al., 2012; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013). Entre los bosques templados, el bosque mesófilo de montaña (BMM) es considerado el tipo de vegetación que alberga mayor diversidad de especies, tanto de flora como de fauna, en relación con su área (González-Espinosa, Meave, Lorea-Hernández, Ibarra-Manríquez, & Newton, 2011; Gual-Díaz & González-Medrano, 2014; Luna-Vega, Alcántara, Contreras-Medina, & Vargas, 2006; Rzedowski, 2006). Se estima que el BMM es el hábitat de más de 6790 especies de plantas vasculares, de las cuales cerca del 35 % son endémicas (Luna-Vega & Magallón, 2010). El área que cubre el BMM no sobrepasa el 1 % del territorio nacional (Sánchez-Ramos & Dirzo, 2014). En México se ha documentado la presencia del BMM en poco más de 100 localidades distribuidas en forma de archipiélago con superficies variables, desde unas pocas hectáreas hasta decenas de miles de hectáreas (González-Espinosa

radiation and strong winds (Luna-Vega & Magallón, 2010; Rzedowski, 2006).

Currently, Mexican CF and its remarkable biodiversity face threats caused by land-use change and continued population expansion into mountainous regions, coupled with the low representation of this ecosystem in the Mexican natural protected areas (Espejo-Serna, 2014; González-Espinosa et al., 2011; Jiménez-García & Peterson, 2019; Ponce-Reyes et al., 2012). Studies carried out with CF plants, using distribution modeling under climate change scenarios, show that, species tend to reduce their distribution areas (Alfonso-Corrado et al., 2017; Jiménez-García & Peterson, 2019; Manzanilla-Quijada et al., 2020; Monterroso-Rivas et al., 2013; Vásquez-Morales et al., 2014).

CF is a threatened type of vegetation, and therefore efforts are required for conservation and study. This study evaluated the distribution of 10 tree species characteristic of CF in the state of Oaxaca, including two climate change scenarios. For this purpose, species distribution models were used to predict the impact of climate change on current and future distribution.

Materials and Methods

Study area

Oaxaca has a land area of 93 758 km². The state has the second largest area of CF with 2 273 km² (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016) distributed in the Sierra Norte (Sierra de Juárez), Cañada (Sierra Mazateca) and Istmo (Chimalapas area) regions on the Gulf slope, and in the Sierra Sur and Mixteca (Sierra Madre del Sur) regions on the Pacific slope (Figure 1). In Oaxaca, the CF is mainly located in areas with altitudes of 1 000 to 2 500 m (Torres-Colín, 2004), mean annual temperature between 16 and 20 °C, and mean annual precipitation of 2 000 to 4 500 mm. Semi-warm and humid temperate climates with frequent fog and summer rains predominate during May to October (Trejo-Vázquez, 2004).

Data collection

A total of ten species of tree genera characteristic of CF were selected (Table 1): *Carpinus tropicalis* (Donn. Sm.) Lundell, *Juglans pyriformis* Liebm., *Liquidambar styraciflua* L., *Litsea glaucescens* Kunth, *Magnolia dealbata* Zucc., *Magnolia schiedeana* Schltld., *Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch, *Symplocos coccinea* Bonpl., *Zinowiewia concinna* Lundell and *Taxus globosa* Schltld (Alcántara, Luna-Vega, & Velázquez, 2002; Rzedowski, 1996). All of these, except for *L. styraciflua*, are included in some risk category according to the Mexican Official Standard NOM-059 (Secretaría del Medio Ambiente

et al., 2011). Esta distribución fragmentaria se limita a zonas montañosas con topografía abrupta, en particular cañadas y zonas protegidas de radiación solar y vientos fuertes (Luna-Vega & Magallón, 2010; Rzedowski, 2006).

Actualmente, el BMM de México y su notable biodiversidad enfrentan amenazas provocadas por el cambio de uso de suelo y la expansión continua de la población hacia las regiones montañosas, aunados a la escasa representación de este ecosistema en las áreas naturales protegidas del país (Espejo-Serna, 2014; González-Espinosa et al., 2011; Jiménez-García & Peterson, 2019; Ponce-Reyes et al., 2012). Los estudios realizados con plantas del BMM, aplicando modelado de distribución bajo escenarios de cambio climático, muestran que, en general, las especies tienden a reducir sus áreas de distribución (Alfonso-Corrado et al., 2017; Jiménez-García & Peterson, 2019; Manzanilla-Quijada et al., 2020; Monterroso-Rivas et al., 2013; Vásquez-Morales et al., 2014).

El BMM es un tipo de vegetación amenazado, por lo que se requieren esfuerzos para su conservación y estudio. En el presente trabajo se evaluó la distribución de 10 especies de árboles, características del BMM en el estado de Oaxaca, considerando dos escenarios de cambio climático. Para ello, se emplearon modelos de distribución de especies que permiten predecir el impacto del cambio climático en su distribución actual y futura.

Materiales y métodos

Área de estudio

Oaxaca posee una extensión territorial de 93 758 km². El estado ocupa el segundo lugar en extensión de BMM con 2 273 km² (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016) distribuidos en las regiones Sierra Norte (Sierra de Juárez), Cañada (Sierra Mazateca) e Istmo (zona de los Chimalapas) en la vertiente del Golfo, y en las regiones Sierra Sur y Mixteca (Sierra Madre del Sur) en la vertiente del Pacífico (Figura 1). En Oaxaca, el BMM se localiza principalmente en zonas con altitudes de 1 000 a 2 500 m (Torres-Colín, 2004), temperatura media anual entre 16 y 20 °C, y precipitación media de 2 000 a 4 500 mm anuales. Los climas semicálidos y templados húmedos con niebla frecuente y lluvias en verano predominan durante los meses de mayo a octubre (Trejo-Vázquez, 2004).

Obtención de datos

Se seleccionaron 10 especies de géneros arbóreos característicos del BMM (Cuadro 1): *Carpinus tropicalis* (Donn. Sm.) Lundell, *Juglans pyriformis* Liebm., *Liquidambar styraciflua* L., *Litsea glaucescens* Kunth,

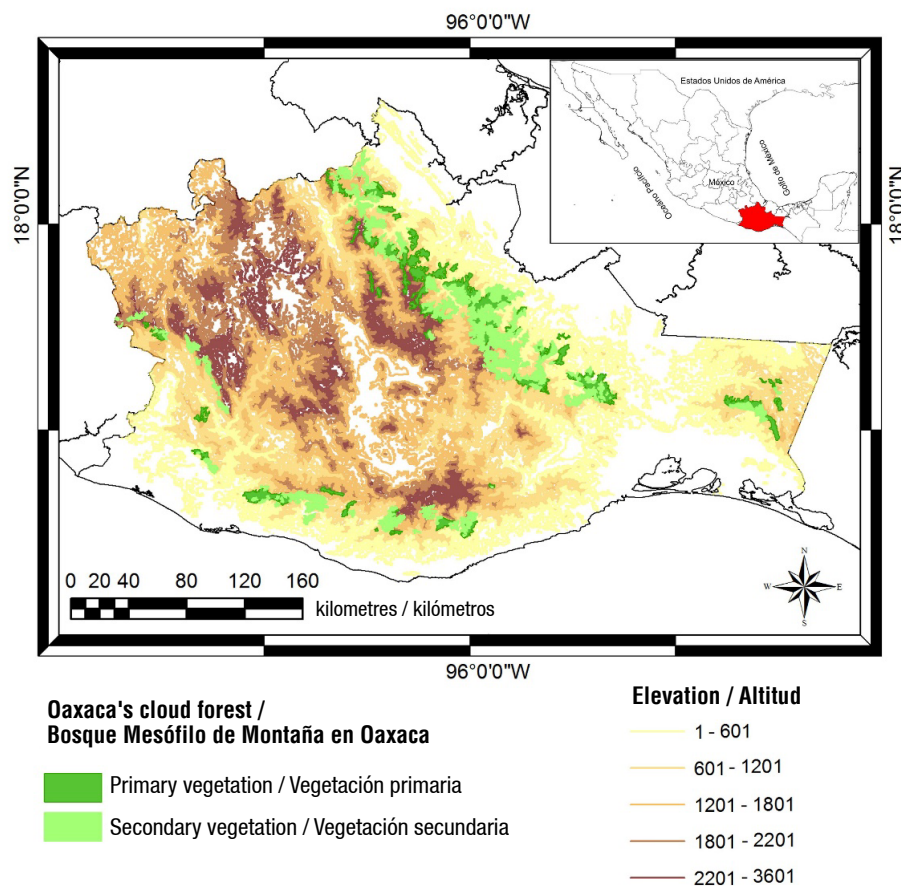


Figure 1. Location map of Oaxaca' cloud forest (INEGI, 2016).

Figura 1. Mapa de localización del bosque mesófilo de montaña en el estado de Oaxaca (INEGI, 2016).

Table 1. Selection of climate variables for the construction of species distribution models according to the Jackknife test.
Cuadro 1. Selección de variables climáticas para la construcción de modelos de distribución de especies de acuerdo con la prueba de Jackknife.

Species / Especies	Climate variables / Variables climáticas
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Bio 2, Bio 4, Bio 6, Bio 9, Bio 10, Bio 14, Bio 15, Bio 16, Bio 17, Bio 19
<i>Carpinus tropicalis</i>	Bio 2, Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 9, Bio 10, Bio 12, Bio 13, Bio 14, Bio 15, Bio 16
<i>Ostrya virginiana</i>	Bio 2, Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 9, Bio 10, Bio 11, Bio 12, Bio 13, Bio 15, Bio 16, Bio 17, Bio 18, Bio 19
<i>Zinowiewia concinna</i>	Bio 5, Bio 6, Bio 9, Bio 10, Bio 11, Bio 16, Bio 17, Bio 18
<i>Juglans pyriformis</i>	Bio 6, Bio 14, Bio 15, Bio 18
<i>Litsea glaucescens</i>	Bio 1, Bio 2, Bio 3, Bio 4, Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 8, Bio 9, Bio 10, Bio 11, Bio 12, Bio 14, Bio 15, Bio 16, Bio 17, Bio 18, Bio 19
<i>Magnolia dealbata</i>	Bio 1, Bio 2, Bio 4, Bio 5, Bio 6, Bio 7, Bio 8, Bio 12, Bio 13, Bio 14, Bio 15, Bio 17, Bio 18, Bio 19
<i>Magnolia schiedeana</i>	Bio 2, Bio 3, Bio 5, Bio 6, Bio 8, Bio 11, Bio 17, Bio 18, Bio 19
<i>Symplocos coccinea</i>	Bio 1, Bio 2, Bio 4, Bio 6, Bio 7, Bio 8, Bio 9, Bio 10, Bio 11, Bio 13, Bio 18, Bio 19
<i>Taxus globosa</i>	Bio 2, Bio 5, Bio 6, Bio 8, Bio 10, Bio 18, Bio 19

Bio 1: average annual temperature (°C). Bio 2: daily temperature oscillation (°C). Bio 3: isothermality (°C). Bio 4: temperature seasonality (°C). Bio 5: average maximum temperature of the warmest period (°C). Bio 6: average minimum temperature of the coldest period (°C). Bio 7: annual temperature oscillation (°C). Bio 8, Bio 9, Bio 10 and Bio 11: average temperature (°C) of the rainiest, driest, warmest and coldest quarters, respectively. Bio 12: annual precipitation (mm). Bio 13 and Bio 14: precipitation (mm) of the rainiest and driest period, respectively. Bio 15: seasonality of precipitation (mm). Bio 16, Bio 17, Bio 18 and Bio 19: precipitation (mm) of the rainiest, driest, warmest and coldest quarters, respectively.

Bio 1: temperatura promedio anual (°C). Bio 2: oscilación diaria de la temperatura (°C). Bio 3: isotermalidad (°C). Bio 4: estacionalidad de la temperatura (°C). Bio 5: temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C). Bio 6: temperatura mínima promedio del periodo más frío (°C). Bio 7: oscilación anual de la temperatura (°C). Bio 8, Bio 9, Bio 10 y Bio 11: temperatura promedio (°C) del trimestre más lluvioso, más seco, más cálido y más frío, respectivamente. Bio 12: precipitación anual (mm). Bio 13 y Bio 14: precipitación (mm) del periodo más lluvioso y más seco, respectivamente. Bio 15: estacionalidad de la precipitación (mm). Bio 16, Bio 17, Bio 18 y Bio 19: precipitación (mm) del trimestre más lluvioso, más seco, más cálido y más frío, respectivamente.

y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010) and with threatened status according to the International Union for Conservation of Nature (IUCN) (González-Espinosa et al., 2011).

Species records were obtained exclusively from specimens deposited in botanical collections in the country: Herbario Nacional de México (MEXU) of the Instituto de Biología, UNAM; Herbario of the Escuela Nacional de Ciencias Biológicas of Instituto Politécnico Nacional (ENCB); Herbario of Instituto de Ecología, A. C. in Xalapa (XAL); Herbario Nacional Forestal (INIF); Herbario of CIIDIR-IPN, Unidad Oaxaca (OAX); Herbario of Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAMIZ); and Herbario de la Sociedad para el Estudio de los Recursos Bióticos de Oaxaca (SERO). A database of georeferenced records for each species was developed with the information obtained. Duplicate records, as well as those located in urban areas, were excluded from the analysis. Information from specimens deposited in herbaria is of great value, because specimens can be examined and reviewed on subsequent occasions and any situation associated with their correct taxonomic determination can be assessed (James et al., 2018).

Climate variables

Current and future models (2050 and 2080) were constructed from 19 climate variables (Table 1) from the WorldClim database (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005). These were generated by interpolation of data from 9000 and 60000 weather stations from the period 1960-1990 and represent monthly values of precipitation, minimum and maximum temperature with a spatial resolution of 0.0083° (about 1 km^2). Such variables have been used in Mexican species distribution modeling studies (Alfonso-Corrado et al., 2017; Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Monterroso-Rivas et al., 2013).

Species distribution modeling

Distribution models were obtained from georeferenced records of species and climate variables. The current and future potential distribution was estimated with the MaxEnt software (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006), which aims to generate inferences based on a series of punctual data combined with climatic information. In this way, the probability of species presence with an uniform distribution is adapted until a maximum entropy is reached. The algorithm implemented in MaxEnt estimates the probability of suitable areas for species distribution from presence data and does not require absence data; moreover, it is particularly efficient when there are few records available (Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Pearson, Raxworthy, Nakamura, & Peterson, 2007; Phillips &

Magnolia dealbata Zucc., *Magnolia schiedeana* Schlttdl., *Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch, *Symplocos coccinea* Bonpl., *Zinowiewia concinna* Lundell y *Taxus globosa* Schlttdl (Alcántara, Luna-Vega, & Velázquez, 2002; Rzedowski, 1996). Todas estas, con excepción de *L. styraciflua*, están incluidas en alguna categoría de riesgo por la Norma Oficial Mexicana NOM-059 vigente (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010) y con estatus de amenazadas según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) (González-Espinosa et al., 2011).

Los registros de las especies se obtuvieron exclusivamente de ejemplares depositados en colecciones botánicas del país: Herbario Nacional de México (MEXU) del Instituto de Biología, UNAM; Herbario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (ENCB); Herbario del Instituto de Ecología, A. C. en Xalapa (XAL); Herbario Nacional Forestal (INIF); Herbario del CIIDIR-IPN, Unidad Oaxaca (OAX); Herbario de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAMIZ); y Herbario de la Sociedad para el Estudio de los Recursos Bióticos de Oaxaca (SERO). Con la información recabada se elaboró una base de datos de registros georreferenciados de cada una de las especies. Los registros duplicados, así como los ubicados en zonas urbanas se excluyeron del análisis. La información proveniente de ejemplares depositados en los herbarios es de gran valor, debido a que los especímenes pueden ser examinados y revisados en ocasiones subsiguientes y cualquier situación asociada a su determinación taxonómica correcta puede ser valorada (James et al., 2018).

Variables climáticas

Los modelos actuales y futuros (2050 y 2080) se construyeron a partir de 19 variables climáticas (Cuadro 1) de la base de datos de WorldClim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005). Estas fueron generadas por interpolación de datos provenientes de entre 9000 y 60000 estaciones meteorológicas del periodo 1960-1990 y representan valores mensuales de precipitación, temperatura mínima y máxima con una resolución espacial de 0.0083° (aproximadamente 1 km^2). Dichas variables se han utilizado en los estudios de modelación de distribución de especies mexicanas (Alfonso-Corrado et al., 2017; Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Monterroso-Rivas et al., 2013).

Modelado de distribución de especies

Los modelos de distribución se obtuvieron a partir de los registros georreferenciados de las especies y de las variables climáticas. La distribución potencial actual y futura se estimó con el programa MaxEnt (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006) que tiene por objetivo generar inferencias con base en una serie de datos

Dudik, 2008). The variable clusters for each species were defined using the Jackknife test in MaxEnt (Phillips et al., 2006). The result of this test identified those variables that provide unique information (Table 1). To calibrate the species modeling, 75 % of the records were used for training and model generation and the remaining 25 % for validation. Twenty replicates and 1000 iterations were used. The clamping and extrapolation options were disabled to keep constant the extreme values of the variables that had a different interval in future climatic conditions and thus avoid artificial extrapolations (Elith et al., 2011). Models were run with the logistic format that uses a suitability interval from 0 to 1, where low values indicate that conditions are not suitable for the presence of the species and high values (>0.5) indicate that conditions are suitable (Manzanilla-Quiñones et al., 2019). The average model for each species optimized the potential distribution and estimated the approximate potential area to be occupied.

Models validation

The models were evaluated with the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve, implemented in MaxEnt, which describes the rate of correct identification of presences against the rate of commission errors. The area under the curve (AUC) was also obtained (Phillips et al., 2006) with values from 0 to 1, regarding that there is a good fit with the evaluation data when the values are close to 1; values between 0.7-0.9 are considered models with good accuracy (Alfonso-Corrado et al., 2017; Phillips & Dudik, 2008), while those greater than 0.9 are considered excellent (Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Peterson et al., 2011).

Furthermore, the models were analyzed with the partial ROC test, which was developed to counterbalance the differences or error of the AUC, since it weights equally the values of commission and omission. The areas on the far right and left side of the AUC represent the high false positive and false negative rates respectively, so that, if the objective is to maximize correct predictions and reduce the value of commission errors, the important parts would be located in the middle and right side of the AUC (Lobo, Jiménez-Valverde, & Real, 2008). In the case of the partial ROC, the values cover the interval from 0 to 2, where 1 is equivalent to a completely random model, while values greater than 1 indicate that models have good prediction of the optimal climatic habitat for species development (Peterson, Papes, & Soberón, 2008). Then, partial ROC, AUC radius ratio, and *P* value were used to evaluate the model (Jiménez-García & Peterson, 2019; Peterson et al., 2008).

puntuales combinados con información climática. De esta forma se ajusta la probabilidad de presencia de las especies con una distribución uniforme hasta llegar a una de entropía máxima. El algoritmo implementado en MaxEnt calcula la probabilidad de áreas idóneas para la distribución de especies a partir de datos de presencia y no requiere datos de ausencia; además, es particularmente eficiente cuando se tienen pocos registros (Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Pearson, Raxworthy, Nakamura, & Peterson, 2007; Phillips & Dudik, 2008). Los conjuntos de variables para cada especie se definieron mediante la prueba de Jackknife en MaxEnt (Phillips et al., 2006). El resultado de esta prueba permitió la identificación de aquellas variables que proporcionan información única (Cuadro 1). Para calibrar el modelado de las especies se utilizó 75 % de los registros para el entrenamiento y generación del modelo y 25 % restante para su validación. Se usaron 20 réplicas y 1000 iteraciones. Las opciones *clamping* y *extrapolación* se desactivaron para mantener constantes los valores extremos de las variables que tuviesen un intervalo diferente en condiciones climáticas futuras y así evitar extrapolaciones artificiales (Elith et al., 2011). Los modelos se generaron con el formato logístico que utiliza un intervalo de idoneidad del 0 al 1, donde los valores bajos indican que las condiciones no son idóneas para la presencia de la especie y los valores altos (>0.5) señalan que las condiciones son adecuadas (Manzanilla-Quiñones et al., 2019). El modelo promedio de cada especie optimizó la distribución potencial y estimó la superficie potencial aproximada que ocuparía.

Validación de los modelos

Los modelos se evaluaron con la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), implementada en MaxEnt, que describe la tasa de identificación correcta de presencias contra la tasa de errores de comisión. También se obtuvo el área bajo la curva (AUC) (Phillips et al., 2006) con valores de 0 a 1, considerando que existe un buen ajuste con los datos de evaluación cuando los valores están próximos a 1; los valores entre 0.7-0.9 se consideran modelos con buena precisión (Alfonso-Corrado et al., 2017; Phillips & Dudik, 2008), mientras que los mayores de 0.9 se consideran excelentes (Manzanilla-Quiñones et al., 2019; Peterson et al., 2011).

Adicionalmente, los modelos se analizaron con la prueba de ROC parcial, la cual se desarrolló para contrarrestar las diferencias o error del AUC, ya que esta pondera por igual los valores de comisión y omisión. Las áreas de la extrema derecha y la parte izquierda del AUC representan las tasas altas de falsos positivos y de falsos negativos respectivamente, de tal forma que, si el objetivo es maximizar las predicciones

Climate change modeling

The general atmospheric circulation model (GCM) used was HadGEM2-ES, which is a climate simulation with favorable projection for the south-southeast region of the country and which decreases uncertainty due to the complex topography of the area (Cavazos et al., 2013; Torres-Alavez, Cavazos, & Turrent, 2014). This climate model has been used by several authors to evaluate biodiversity aspects in the country (Arce-Romero, Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Cruz-León, 2017; Cavazos et al., 2013; Durán et al., 2016).

The IPCC 5th Assessment Report (2014) defined four emission scenarios called Representative Concentration Pathways (RCPs). These are identified by their radiative forcing for the year 2100 ranging from 2.6 to 8.5 $W \cdot m^{-2}$. Each RCP has an associated high spatial resolution database of pollution emissions, greenhouse gases (GHG) emissions and concentrations, and land use up to 2100, based on a combination of models of varying complexity of atmospheric chemistry and the carbon cycle. It includes a severe mitigation scenario (RCP 2.6), two intermediate scenarios (RCP 4.5 and 6.0) and a scenario with a very high level of GHG emissions (RCP 8.5). RCP 4.5 represents a scenario that maintains a stable radiative forcing for 2100, with a CO_2 concentration of 538 ppm and a temperature increase of 2.5 °C. For RCP 6.0 and 8.5, the trend of their radiative forcing will be increasing, with a concentration of 670 ppm and 936 ppm CO_2 , respectively, while temperature will increase by approximately 3 °C and 5 °C, respectively (Cavazos et al., 2013; IPCC, 2014). In the present study, two emission scenarios were considered, RCP 4.5 and RCP 8.5, which represent the extremes of atmospheric conditions and have been used in climate change assessments in tree species in Mexico (Alfonso-Corrado et al., 2017; Arce-Romero et al., 2017; Durán et al., 2016; Jiménez-García & Peterson, 2019; Pérez-Miranda et al., 2019). As for the time horizons (TH), 2050 and 2080 are available for the MGC used, as well as for their RCPs, with a spatial resolution of approximately 1 km^2 . The resulting maps were visualized and manipulated using ArcGis (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012).

Evaluation of changes in distribution areas

Distribution model maps for each species were reclassified. Each was assigned an interval with five presence classes (very high, high, medium, medium, low and very low) to analyze, in a simple way, the probability of the species to be distributed in an area.

The percentage change in species distribution was calculated according to Gutiérrez and Trejo (2014) and the number of pixels for each of the proposed

correctas y restar valor a los errores de comisión, las partes importantes se ubicarían en la parte central y derecha del AUC (Lobo, Jiménez-Valverde, & Real, 2008). En el caso de la ROC parcial, los valores abarcan el intervalo de 0 a 2, donde 1 equivale a un modelo totalmente al azar, mientras que los valores superiores a 1 indican que los modelos tienen buena predicción del hábitat climático óptimo para el desarrollo de las especies (Peterson, Papes, & Soberón, 2008). Entonces, para evaluar el modelo se utilizó la ROC parcial, la proporción del radio del AUC y el valor de P (Jiménez-García & Peterson, 2019; Peterson et al., 2008).

Modelado de cambio climático

El modelo general de circulación atmosférica (MGC) utilizado fue HadGEM2-ES, el cual es una simulación climática con proyección favorable para la región sureste del país y que disminuye la incertidumbre debido a la topografía compleja de la zona (Cavazos et al., 2013; Torres-Alavez, Cavazos, & Turrent, 2014). Este modelo climático ha sido utilizado por varios autores para evaluar aspectos de biodiversidad en el país (Arce-Romero, Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, & Cruz-León, 2017; Cavazos et al., 2013; Durán et al., 2016).

En el 5° informe de evaluación del IPCC (2014) se definieron cuatro escenarios de emisión denominados Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). Estos se identifican por su forzamiento radiativo para el año 2100 que varía de 2.6 a 8.5 $W \cdot m^{-2}$. Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes, emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y uso de suelo hasta el año 2100, fundada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono. Se incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP 2.6), dos escenarios intermedios (RCP 4.5 y 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5). El RCP 4.5 representa un escenario que mantiene un forzamiento radiativo estable para el 2100, con una concentración de 538 ppm de CO_2 y aumento de la temperatura de 2.5 °C. Para los RCP 6.0 y 8.5, la tendencia de su forzamiento radiativo será creciente, con una concentración de 670 ppm y 936 ppm de CO_2 , respectivamente, mientras que la temperatura aumentará aproximadamente 3 °C y 5 °C, respectivamente (Cavazos et al., 2013; IPCC, 2014). En el presente estudio se tomaron en cuenta dos escenarios de emisión, el RCP 4.5 y el RCP 8.5, que representan los extremos de las condiciones atmosféricas y han sido utilizados en evaluaciones de cambio climático en especies arbóreas de México (Alfonso-Corrado et al., 2017; Arce-Romero et al., 2017; Durán et al., 2016; Jiménez-García & Peterson, 2019; Pérez-Miranda et al., 2019). En cuanto a los horizontes de tiempo (HT) se encuentran disponibles el 2050 y 2080 para el MGC utilizado, así como para sus RCP, con

classes was quantified. This process was carried out for each of the species, for the two THs and for the two RCPs, by applying the formula $\% = \left[\frac{(t_1 - t_0)}{t_0} \times 100 \right]$; where, t_0 and t_1 are the number of pixels of presence for the current time and for the future time horizon, respectively.

Results

Current distribution models

A total of 356 records were obtained for the 10 species: *C. tropicalis* (34), *J. pyriformis* (10), *L. styraciflua* (63), *L. glaucescens* (125), *M. dealbata* (17), *M. schiedeana* (11), *O. virginiana* (39), *S. coccinea* (28), *Z. concinna* (8) and *T. globosa* (21). The current potential distribution area obtained by the models for each species is shown in Table 2; all presented AUC greater than 0.8 and partial ROC greater than 1.7.

Evaluation of climate change models

RCP 4.5: 2050 and 2080 time horizons

In the first period analyzed (current-2050), species responses were classified as negative or positive. Negative responses are those showing losses in their distribution area, while positive responses indicate gains. Of the selected species only *J. pyriformis* (Figure 2) showed a positive response with an increase of 83.6 %. In the case of *L. glaucescens*, the distribution area is maintained with respect to the current one. The rest of the species had a negative response; most of them did not present a loss of more than 30 % with respect to the current potential area (Figure 3).

For the second period (current-2080), the responses were different. Four of the species increased their distribution: *J. pyriformis* (20.5 %), *L. styraciflua* (7.8 %), *L. glaucescens* (2.8 %) and *S. coccinea* (6.9 %). *Zinowiewia concinna* reported a minimal gain (0.15 %); however, although its response can be considered positive, it does not represent a significant change. The rest of the species had a negative response, but compared to the first period, the percentage change was less than 20 % (Figure 3).

RCP 8.5: 2050 and 2080 time horizons

Modeling with RCP 8.5 scenario (current-2050) showed that *J. pyriformis* (Figure 2) and *O. virginiana* (Figure 4) have positive response with a gain greater than 5 % of their current potential distribution. The remaining eight species had a negative response with a distribution area loss of no more than 10 % (Figure 5).

For the second period of this scenario (current-2080), all species showed negative response; that is, some of

una resolución espacial de aproximadamente 1 km². Los mapas resultantes se visualizaron y manipularon mediante ArcGis (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012).

Evaluación de las modificaciones en las áreas de distribución

Los mapas de los modelos de distribución de cada una de las especies se reclasificaron. A cada uno se le asignó un intervalo con cinco clases de presencia (muy alta, alta, media, baja y muy baja) con el fin de analizar, de forma sencilla, la probabilidad que tiene la especie de distribuirse en un área.

El porcentaje de cambio en la distribución de las especies se calculó de acuerdo con Gutiérrez y Trejo (2014) y se cuantificó el número de píxeles para cada una de las clases propuestas. Este proceso se llevó a cabo para cada una de las especies, para los dos HT y para los dos RCP, mediante la aplicación de la fórmula $\% = \left[\frac{(t_1 - t_0)}{t_0} \times 100 \right]$; donde, t_0 y t_1 son el número de píxeles de presencia para el tiempo actual y para el horizonte de tiempo futuro, respectivamente.

Resultados

Modelos de distribución actual

Se obtuvieron 356 registros para las 10 especies: *C. tropicalis* (34), *J. pyriformis* (10), *L. styraciflua* (63), *L. glaucescens* (125), *M. dealbata* (17), *M. schiedeana* (11), *O. virginiana* (39), *S. coccinea* (28), *Z. concinna* (8) y *T. globosa* (21). El área de distribución potencial actual obtenida por los modelos de cada una de las especies se muestra en el Cuadro 2; todos presentaron AUC mayor de 0.8 y ROC parcial mayor de 1.7.

Evaluación de los modelos de cambio climático

RCP 4.5: Horizontes de tiempo 2050 y 2080

En el primer periodo analizado (actual-2050), las respuestas de las especies se clasificaron como negativas o positivas. Las respuestas negativas son aquellas que muestran pérdidas en su área de distribución, mientras que las positivas indican ganancias. De las especies seleccionadas solamente *J. pyriformis* (Figura 2) presentó respuesta positiva con un aumento de 83.6 %. En el caso de *L. glaucescens*, el área de distribución se mantiene con respecto al actual. El resto de las especies tuvieron respuesta negativa; la mayoría de ellas no presentan una pérdida mayor de 30 % con respecto al área potencial actual (Figura 3).

Para el segundo periodo (actual-2080), las respuestas fueron diferentes. Cuatro de las especies aumentaron su área de distribución: *J. pyriformis* (20.5 %), *L. styraciflua*

Table 2. Current potential distribution area estimated for the species analyzed and values of the respective area under the curve (AUC) and partial ROC (Receiver Operating Characteristic) curve.

Cuadro 2. Área de distribución potencial actual estimada para las especies analizadas y valores del área bajo la curva (AUC) y curva ROC (Receiver Operating Characteristic) parcial respectivos.

Species/ Especies	Area/ Área	AUC / Área bajo la curva AUC	Partial ROC/ ROC parcial
<i>Liquidambar styraciflua</i>	1 919 km ²	0.901	1.869
<i>Carpinus tropicalis</i>	2 578 km ²	0.871	1.840
<i>Ostrya virginiana</i>	2 573 km ²	0.848	1.825
<i>Zinowiewia concinna</i>	3 300 km ²	0.828	1.767
<i>Juglans pyriformis</i>	1 768 km ²	0.826	1.721
<i>Litsea glaucescens</i>	3 350 km ²	0.835	1.760
<i>Magnolia dealbata</i>	1 406 km ²	0.928	1.890
<i>Magnolia schiedeana</i>	1 832 km ²	0.849	1.770
<i>Symplocos coccinea</i>	651 km ²	0.964	1.922
<i>Taxus globosa</i>	529 km ²	0.971	1.974

them lost more than 10 % of their distribution area with respect to the current one (Figure 5).

Discussion

According to the information predicted by the models, the species studied will be subject to pressures as a consequence of the alterations caused in the environment by climate change (e.g. increase in aridity and decrease in precipitation). Species will have to respond to such changes in relatively short times (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2004). Survival will depend on their ability to adapt to climate change and their ability to migrate to places with optimal conditions (Gray, 2005; Martínez-Meyer, Díaz-Porras, Peterson, & Yañez-Arenas, 2013; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013). However, it should be considered that changes in vegetation distribution occur slowly and that the areas in which they become established may not be suitable soils for the species (Gray, 2005).

M. schiedeana and *Z. concinna* were poorly represented in herbaria; in some cases, herbarium records show the limited distribution of a species and its low population density (Contreras-Medina, Luna-Vega, & Ríos-Muñoz, 2010). Therefore, the study of these species is important due to the risk of decline in their distribution area, as nine of these species are within a threatened category in the Mexican Official Standard NOM-059 (SEMARNAT, 2010). Unfortunately, the low number of specimens recorded in herbaria prevents the elaboration of conclusive distribution models; this problem is evident in most species of the flora of Mexico, due to the scarcity of studies documenting the complete

(7.8 %), *L. glaucescens* (2.8 %) y *S. coccinea* (6.9 %). La especie *Z. concinna* registró una ganancia mínima (0.15 %); sin embargo, aunque su respuesta puede considerarse positiva no representa un cambio significativo. El resto de las especies tuvo respuesta negativa, pero en comparación con el primer periodo, el porcentaje de cambio fue menor de 20 % (Figura 3).

RCP 8.5: Horizontes de tiempo 2050 y 2080

El modelado con escenario RCP 8.5 (actual-2050) mostró que *J. pyriformis* (Figura 2) y *O. virginiana* (Figura 4) tienen respuesta positiva con una ganancia mayor de 5 % de su distribución potencial actual. Las ocho especies restantes tuvieron respuesta negativa con pérdida en su área de distribución no mayor de 10 % (Figura 5).

Para el segundo periodo de este escenario (actual-2080), todas las especies mostraron respuesta negativa; es decir, algunas de ellas perdieron más de 10 % de su área de distribución con respecto a la actual (Figura 5).

Discusión

De acuerdo con la información predicha por los modelos, las especies estudiadas estarán sujetas a presiones como consecuencia de las alteraciones provocadas en el ambiente por el cambio climático (v. g. incremento en la aridez y disminución de la precipitación). Las especies deberán responder a tales cambios en tiempos relativamente cortos (Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2004). La supervivencia de estas dependerá de su capacidad de adaptación al cambio climático y de su habilidad para migrar a lugares de condiciones óptimas (Gray, 2005; Martínez-Meyer,

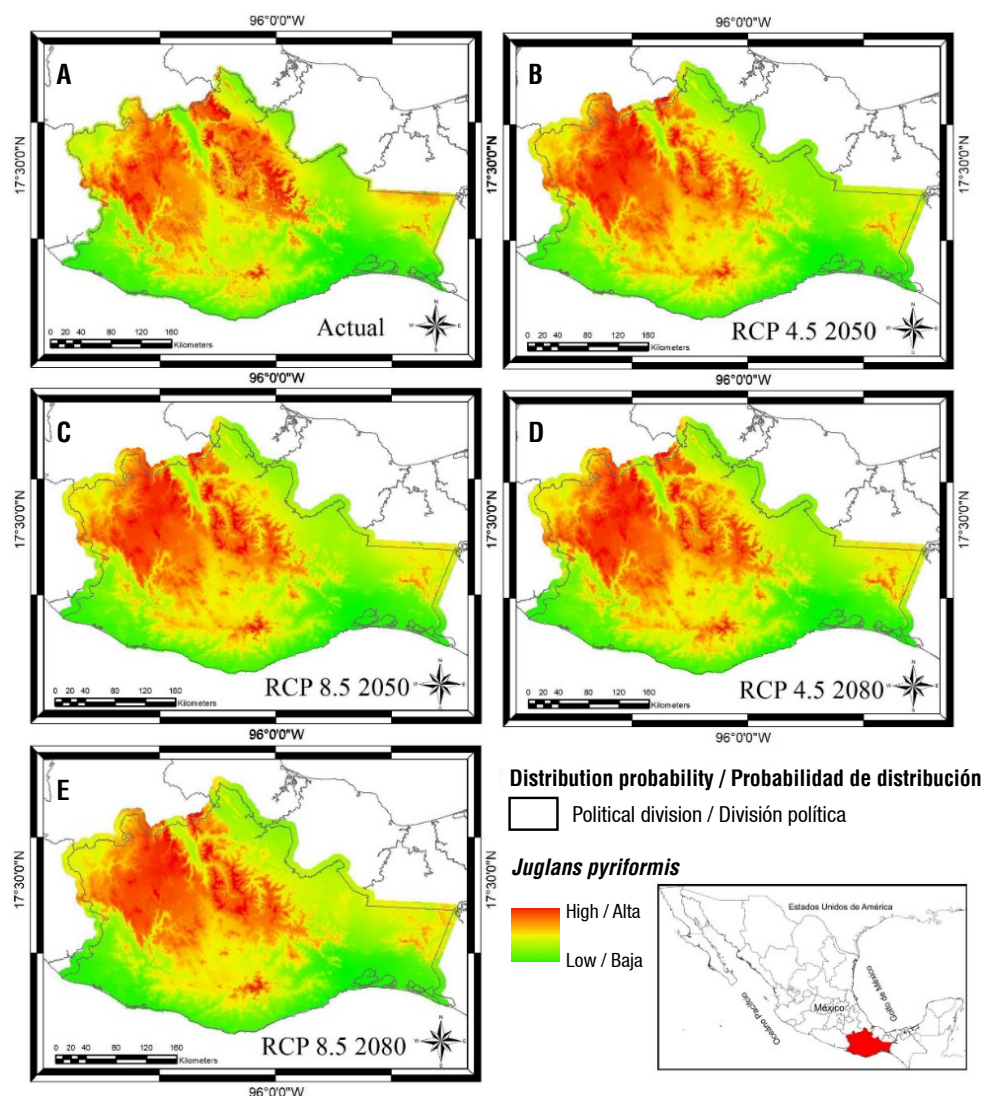


Figure 2. Distribution models of *Juglans pyriformis* in Oaxaca, Mexico. A) Current modeling (1 768 km²), B) RCP 4.5 2050 scenario (3 248 km²), C) RCP 4.5 2080 scenario (2 132 km²), D) RCP 8.5 2050 scenario (2 004 km²), E) RCP 8.5 2080 scenario (1 278 km²).

Figura 2. Modelos de distribución de *Juglans pyriformis* en Oaxaca, México. A) Modelado actual (1 768 km²), B) escenario RCP 4.5 2050 (3 248 km²), C) escenario RCP 4.5 2080 (2 132 km²), D) escenario RCP 8.5 2050 (2 004 km²), E) escenario RCP 8.5 2080 (1 278 km²).

distribution area of the species. However, some authors consider that the model of a species, even if it has few records, is important, because it represents a guide to the specific sites where it can be found and where there is still no evidence of its presence (Alfonso-Corrado et al., 2017; Pearson et al., 2007). In addition, they are of great help in the estimation of the existing diversity in Natural Protected Areas to formulate a conservation program (Alfonso-Corrado et al., 2017; Jiménez-García & Peterson, 2019).

CF require specific climatic conditions for survival, mainly moisture (Luna-Vega & Magallón, 2010; Monterroso-Rivas et al., 2013; Rzedowski, 1996). Climate change reduces the entry of moisture into

Díaz-Porras, Peterson, & Yañez-Arenas, 2013; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013). No obstante, se debe considerar que los cambios de distribución en la vegetación se dan lentamente y que las zonas en las que se establezcan pueden no ser apropiadas edáficamente para las especies (Gray, 2005).

M. schiedeana y *Z. concinna* fueron representadas pobremente en los herbarios; en algunos casos, los registros del herbario muestran la distribución limitada de una especie y su baja densidad poblacional (Contreras-Medina, Luna-Vega, & Ríos-Muñoz, 2010). Por lo anterior, el estudio de tales especies resulta importante dado el inminente riesgo de disminución en su área de distribución, ya que nueve

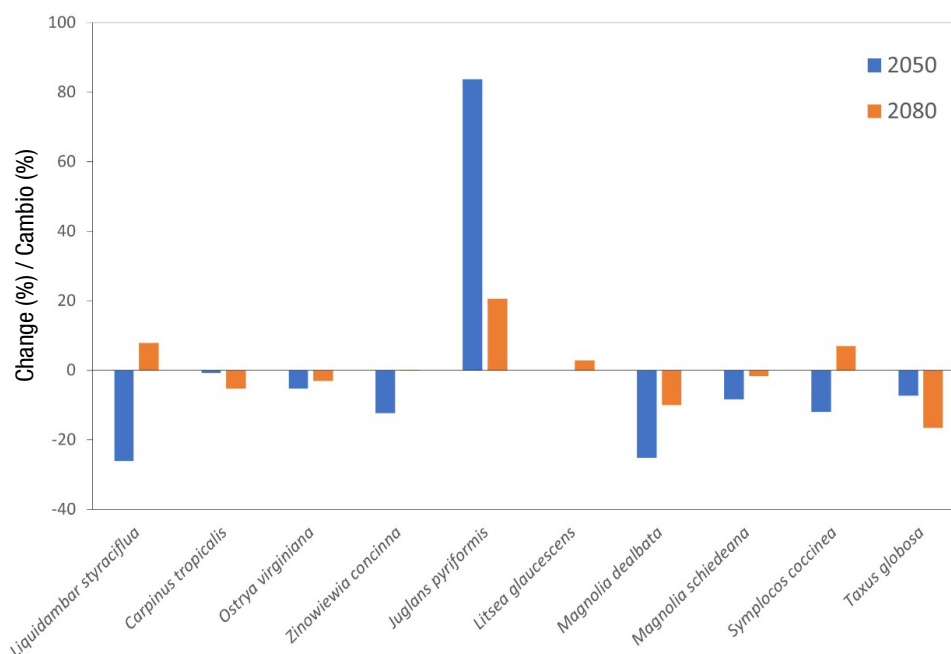


Figure 3. Change in the distribution area of cloud forest species for the years 2050 and 2080 under the RCP 4.5 scenario in Oaxaca, Mexico.

Figura 3. Cambio en el área de distribución de las especies del bosque mesófilo de montaña para los años 2050 y 2080 bajo el escenario RCP 4.5 en Oaxaca, México.

forests and their maintenance, leading to their fragmentation and loss of less drought-tolerant species, causing some plant and animal populations to become locally extinct (Alfonso-Corrado et al., 2017; Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003).

The response of each species regarding the climate change scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) indicates that most of these species reduce their distribution area and very few are likely to expand it. This varied response is due to the establishment of optimal environmental conditions that facilitate the expansion of species expansion or limiting conditions that prevent it, a situation directly related to the intrinsic characteristics of taxa (Martínez-Meyer, 2012). Climate change is a factor that promotes the reduction of distribution areas of temperate taxa, rather than gain. The results are congruent with those already reported for other taxonomic groups of the biota of Mexico (Alfonso-Corrado et al., 2017; Arce-Romero et al., 2017; Durán et al., 2016; Gutiérrez & Trejo, 2014; Jiménez-García & Peterson, 2019; Luna-Vega, Alcántara, Contreras-Medina, & Ríos-Muñoz, 2012; Manzanilla-Quijada et al., 2020; Monterroso-Rivas et al., 2013; Pérez-Miranda et al., 2019; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013).

Vásquez-Morales et al. (2014) reported that, in the year 2050, the distribution of *M. schiedeana* will decrease 0.36 %, while by 2080 the decrease will be 1.94 %. The results of this study indicate that, for TH 2050

de estas se encuentran dentro de alguna categoría de peligro de la Norma Oficial Mexicana NOM-059 vigente (SEMARNAT, 2010). Desafortunadamente, el número bajo de especímenes registrados en los herbarios impide la elaboración de modelos de distribución concluyentes; este problema es evidente en la mayoría de las especies de la flora de México, debido a la escasez de trabajos que documenten el área de distribución completa de las especies. No obstante, algunos autores consideran que el modelo de una especie, aunque cuente con pocos registros, es importante, ya que representa una guía hacia los sitios específicos donde puede encontrarse y que aún no hay evidencia de su presencia (Alfonso-Corrado et al., 2017; Pearson et al., 2007); además, son de gran ayuda en la estimación de la diversidad existente en las Áreas Naturales Protegidas para formular un programa de conservación (Alfonso-Corrado et al., 2017; Jiménez-García & Peterson, 2019).

El BMM requiere de ciertas condiciones climáticas para su existencia, principalmente de humedad (Luna-Vega & Magallón, 2010; Monterroso-Rivas et al., 2013; Rzedowski, 1996). El cambio climático reduce el ingreso de la humedad en los bosques y su mantenimiento, lo que provoca su fragmentación y pérdida de especies menos tolerantes a la sequía, ocasionando que algunas poblaciones de plantas y animales se extingan localmente (Alfonso-Corrado et al., 2017; Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003).

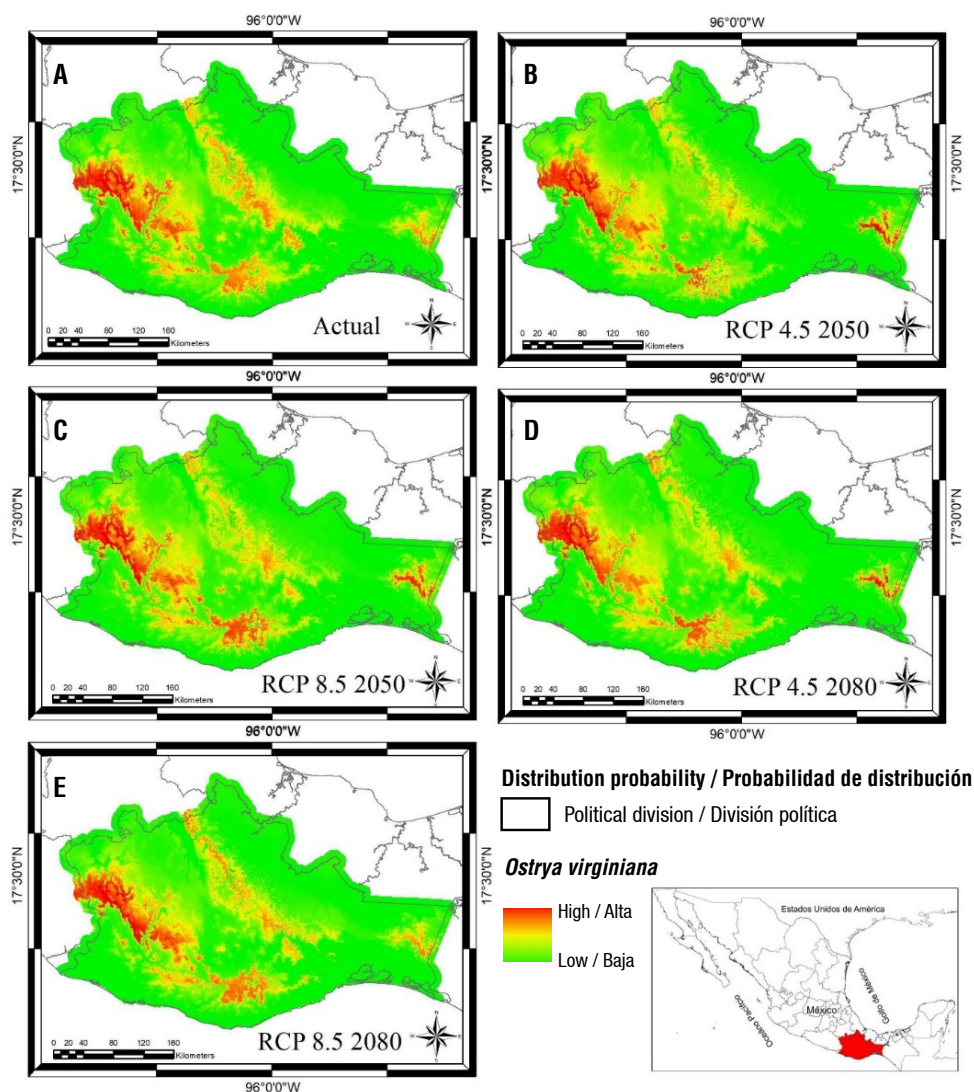


Figure 4. Distribution models of *Ostrya virginiana* in Oaxaca, Mexico. A) Current modeling (2 573 km²), B) RCP 4.5 2050 scenario (2 438 km²), C) RCP 4.5 2080 scenario (2 494 km²), D) RCP 8.5 2050 scenario (2 787 km²), E) RCP 8.5 2080 scenario (2 473 km²).

Figura 4. Modelos de distribución de *Ostrya virginiana* en Oaxaca, México. A) modelado actual (2 573 km²), B) escenario RCP 4.5 2050 (2 438 km²), C) escenario RCP 4.5 2080 (2 494 km²), D) escenario RCP 8.5 2050 (2 787 km²), E) escenario RCP 8.5 2080 (2 473 km²).

RCP 4.5, the loss of area will be 8.35 %, and for RCP 8.5, the species increases almost 1 % of the area with respect to the present one. For TH 2080, both scenarios (4.5 and 8.5) lose considerable area (1.64 % and 13.67 %, respectively). The methodology used by Vásquez-Morales et al. (2014) is different from that of the present study, as well as the evaluation they performed for the entire distribution area in the country and the scenarios used that consider different values and characteristics.

Contreras-Medina et al. (2010) modeled the potential distribution of *T. globosa* for the entire country and used three land use scenarios for 1976, 1996 and 2000. That study reported a significant reduction in distribution

La respuesta de cada una de las especies en relación con los escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y RCP 8.5) indica que la mayoría de estas perdieron área de distribución y muy pocas probablemente la ampliarán. Esta respuesta diferenciada se debe al establecimiento de condiciones ambientales óptimas que facilitan la expansión del área de distribución de las especies o de condiciones limitantes que la impidan, situación relacionada directamente con las características intrínsecas de los taxones (Martínez-Meyer, 2012). El cambio climático es un factor que promueve generalmente la reducción del área de distribución de taxones templados, más que la ganancia. Los resultados son congruentes con los ya reportados para otros grupos taxonómicos de la biota de México (Alfonso-

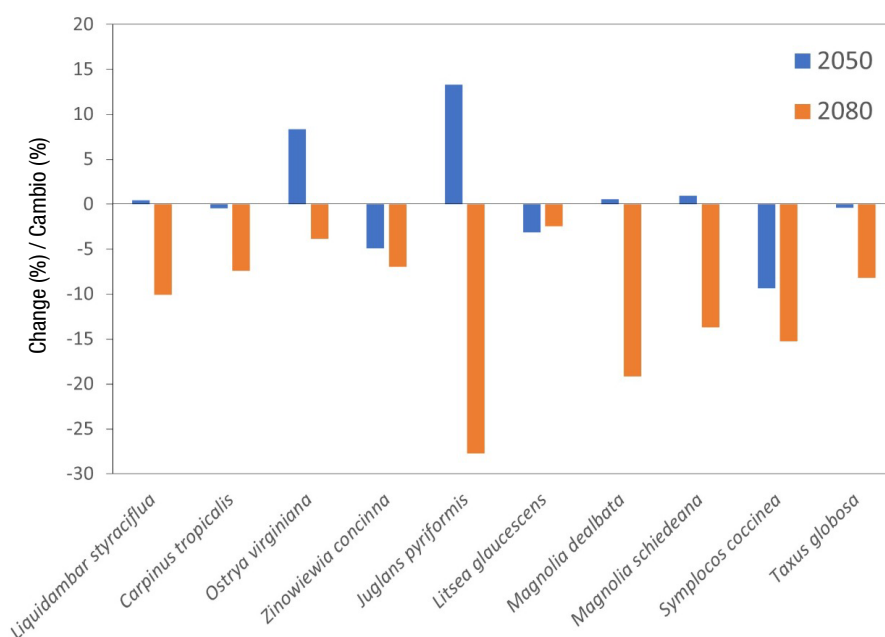


Figure 5. Change in the distribution area of cloud forest species for the years 2050 and 2080 under the RCP 4.5 scenario in Oaxaca, Mexico.

Figura 5. Cambio en el área de distribución de las especies del bosque mesófilo de montaña para los años 2050 y 2080 bajo el escenario RCP 8.5 en Oaxaca, México.

of up to 84 %. In comparison with the analyses of the present study, the reduction situation prevails in all future climate change scenarios.

Monterroso-Rivas et al. (2013) analyzed the distribution of some CF tree species under climate change scenarios in Hidalgo, including *C. tropicalis* and *L. styraciflua*. The authors concluded that the latter will benefit from changes in future climate, as it increases its distribution area because it is a species that grows well in disturbed environments, while for *C. tropicalis* the climatic conditions will become adverse. The results of the present study are similar for *C. tropicalis* in both scenarios and in the two TH considered, while *L. styraciflua* shows variations of increase or decrease depending on the emissions scenario and the TH analyzed.

Jiménez-García and Peterson (2019) modeled the ecological niche of several CF tree species under climate change scenarios in mountainous areas of Mexico by 2050, including *S. coccinea*. These authors concluded that the distribution area is reduced under both emission scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5), a situation that coincides with the results of the present study.

The distribution models for the species in this study show areas where they have not been recorded, possibly due to lack of sampling in specific areas of Oaxaca as suggested by some authors (García-Mendoza

Corrado et al., 2017; Arce-Romero et al., 2017; Durán et al., 2016; Gutiérrez & Trejo, 2014; Jiménez-García & Peterson, 2019; Luna-Vega, Alcántara, Contreras-Medina, & Ríos-Muñoz, 2012; Manzanilla-Quijada et al., 2020; Monterroso-Rivas et al., 2013; Pérez-Miranda et al., 2019; Villers-Ruiz & Castañeda-Aguado, 2013).

Vásquez-Morales et al. (2014) reportaron que, en el año 2050, la distribución de *M. schiedeana* disminuirá 0.36 %, mientras que para el 2080 el decremento será de 1.94 %. Los resultados del presente trabajo indican que, para el HT 2050 RCP 4.5, la pérdida de área será de 8.35 %, y para el RCP 8.5, la especie aumenta casi 1 % del área con respecto a la actual. Para el HT 2080, ambos escenarios (4.5 y 8.5) pierden área considerable (1.64 % y 13.67 %, respectivamente). La metodología utilizada por Vásquez-Morales et al. (2014) es distinta a la del presente estudio, así como la evaluación que realizaron para toda el área de distribución en el país y los escenarios utilizados que consideran valores y características diferentes.

Contreras-Medina et al. (2010) modelaron la distribución potencial de *T. globosa* para todo el país y utilizaron tres escenarios de uso de suelo para 1976, 1996 y 2000. En dicho estudio se registró reducción importante en la distribución de hasta 84 %. En comparación con los análisis del presente estudio, la situación de reducción prevalece en todos los escenarios futuros de cambio climático.

& Meave, 2011; Ramírez-Toro et al., 2017). These models can be used for the formulation of a grounded and consistent proposal of priority areas for conservation and natural protected areas of temperate forests in Oaxaca, considering that the Sierra Norte is the region with the largest area of CF in the country (Anta-Fonseca et al., 2010). Recently, the vulnerability of Oaxaca's CF to climate change has been exhibited, showing that the Sierra Norte is a key area that requires protection (Alfonso-Corrado et al., 2017; Anta-Fonseca et al., 2010; Gómez-Mendoza, Galicia, & Aguilar-Santelises, 2008; Jiménez-García & Peterson, 2019; Ponce-Reyes et al., 2012), a region where inhabit almost all the species analyzed in this study.

Conclusions

The distribution models provided valuable information on the areas with probability of presence of 10 tree species of cloud forest (CF) in their current and future distribution (2050 and 2080) in Oaxaca. Current climatic conditions will be affected, and species will tend to reduce their distribution areas, mainly under the RCP 8.5 scenario and the 2080 horizon; consequently, the CF will also be affected as an ecosystem. The distribution of some of the species was modeled for the first time and the analysis supports their inclusion as threatened and in some risk category based on NOM-059. The predictive models indicate that it is necessary to further evaluate the populations and the particular requirements of the species, to propose actions for preservation and monitoring under climate change, as well as for the protection of an important and biodiverse ecosystem in Mexico that is already considered threatened.

Acknowledgments

The authors thank three anonymous reviewers for their suggestions and comments to improve the manuscript. Thanks to Othón Alcántara Ayala for the preparation of the maps. Also, thanks to the botanical collection curators cited in the text for the facilities granted for the consultation of specimens: David Gernandt (MEXU), Rafael Fernández Nava (ENCB), Sergio Avendaño Reyes (XAL), Marisela Zamora Martínez (INIF), Remedios Aguilar Santelises (OAX), Ana Rosa López Ferrari (UAMIZ) and Silvia Salas Morales (SERO). The authors thank the DGAPA PAPIIT IN220621 project of the UNAM.

Monterroso-Rivas et al. (2013) analizaron la distribución de algunas especies arbóreas del BMM bajo escenarios de cambio climático en Hidalgo, dentro de las cuales incluyeron a *C. tropicalis* y *L. styraciflua*. Los autores concluyeron que esta última será beneficiada por los cambios en el clima futuro, pues incrementa su área de distribución al ser una especie que se desarrolla bien en ambientes perturbados, mientras que para *C. tropicalis* las condiciones climáticas se volverán adversas. Los resultados del presente estudio son similares para *C. tropicalis* en ambos escenarios y en los dos HT considerados, mientras que *L. styraciflua* muestra variaciones de incremento o de disminución dependiendo del escenario de emisiones y el HT analizado.

Jiménez-García y Peterson (2019) modelaron el nicho ecológico de varias especies arbóreas del BMM bajo escenarios de cambio climático en zonas montañosas de México para el 2050, dentro de las cuales incluyeron a *S. coccinea*. Estos autores concluyeron que el área de distribución se reduce bajo ambos escenarios de emisión (RCP 4.5 y RCP 8.5), situación que coincide con los resultados del presente estudio.

Los modelos de distribución para las especies de este estudio muestran áreas donde no se han registrado, posiblemente por falta de muestreo en ciertas zonas del estado de Oaxaca como lo sugieren algunos autores (García-Mendoza & Meave, 2011; Ramírez-Toro et al., 2017). Dichos modelos pueden utilizarse para la formulación de una propuesta fundamentada y robusta de áreas prioritarias para la conservación y áreas naturales protegidas de los bosques templados de Oaxaca, considerando que la Sierra Norte constituye la región con mayor superficie de BMM en el país (Anta-Fonseca et al., 2010). Recientemente, se ha exhibido la vulnerabilidad del BMM de Oaxaca ante el cambio climático, evidenciando que la Sierra Norte es un área clave que requiere protección (Alfonso-Corrado et al., 2017; Anta-Fonseca et al., 2010; Gómez-Mendoza, Galicia, & Aguilar-Santelises, 2008; Jiménez-García & Peterson, 2019; Ponce-Reyes et al., 2012), región donde habitan casi todas las especies aquí analizadas.

Conclusiones

Los modelos de distribución brindaron información valiosa sobre las áreas con probabilidad de presencia de 10 especies arbóreas del bosque mesófilo de montaña (BMM) en su distribución actual y futura (2050 y 2080) en Oaxaca. Las condiciones climáticas actuales se verán afectadas y las especies tenderán a la reducción de sus áreas de distribución, principalmente bajo el escenario RCP 8.5 y horizonte 2080; en consecuencia, el BMM también se verá perjudicado como ecosistema. La distribución de algunas de las especies se modeló

End of English version

References / Referencias

- Alcántara, O., Luna-Vega, I., & Velázquez, A. (2002). Altitudinal distribution patterns of Mexican cloud forests based upon preferential characteristic genera. *Plant Ecology*, 161(2), 167–174. doi: 10.1023/A:1020343410735
- Alfonso-Corrado, C., Naranjo-Luna, F., Clark-Tapia, R., Campos, J. E., Rojas-Soto, O. R., Luna-Krauletz, ... Pacheco-Cruz, N. (2017). Effects of environmental changes on the occurrence of *Oreomunnea mexicana* (Juglandaceae) in a biodiversity hotspot cloud forest. *Forests*, 8(8), 1–15. doi: 10.3390/f8080261
- Anta-Fonseca, S., Galindo, C., González-Medrano, F., Koleff, P., Meave, J., Moya, H., & Victoria, A. (2010). Sierra Norte de Oaxaca. In T. Toledo (Ed.), *El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible* (pp. 108–115). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Arce-Romero, A. R., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Cruz-León, A. (2017). Mexican plums (*Spondias* spp.): their current distribution and potential distribution under climate change scenarios for Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23(1), 5–19. doi: 10.5154/r.rchsh.2016.06.020
- Cavazos, T., Salinas, J., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto, R., ... Bravo, M. (2013). *Actualización de los escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional (Informe final)*. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. (2010). Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio de uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(3), 421–433. doi: 10.4067/S0716-078X2010000300009
- Durán, N., Loya, J., Ruiz, J., González, D., García, J., & Martínez, S. (2016). Impactos del cambio climático en la distribución potencial de *Morus alba* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2511–2521. doi: 10.29312/remexca.v0i13.475
- Elith, J., Phillips S. J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- Espejo-Serna, A. (2014). Las plantas vasculares de los bosques mesófilos de montaña en México. In M. Gual-Díaz, & A. Rendón-Correa (Eds.), *Bosque mesófilo de montaña de México: diversidad, ecología y manejo* (pp. 189–195). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso para la Biodiversidad.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). *ArcGis*. California, USA: Author.
- García-Mendoza, A., & Meave, J. (2011). *Diversidad florística de Oaxaca: de musgos a angiospermas*. Ciudad de México, México: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México-CONABIO.
- Gómez-Mendoza, L., Galicia, L., & Aguilar-Santelises, R. (2008). Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, 67, 76–100. doi: 10.14350/ig.17991
- por primera vez y el análisis apoya su inclusión como amenazadas y en alguna categoría de riesgo con base en la NOM-059. Los modelos predictivos señalan que es necesario profundizar en la evaluación de las poblaciones y los requerimientos particulares de las especies, con el fin de proponer acciones para su preservación y monitoreo ante el cambio climático, así como para la protección de un ecosistema importante y biodiverso de México que ya se considera amenazado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a tres revisores anónimos por sus sugerencias y comentarios para mejorar el manuscrito. A Othón Alcántara Ayala por la elaboración de los mapas. A los curadores de las colecciones botánicas citadas en el texto por las facilidades otorgadas para la consulta de ejemplares: David Gernandt (MEXU), Rafael Fernández Nava (ENCB), Sergio Avendaño Reyes (XAL), Marisela Zamora Martínez (INIF), Remedios Aguilar Santelises (OAX), Ana Rosa López Ferrari (UAMIZ) y Silvia Salas Morales (SERO). Al proyecto DGAPA PAPIIT IN220621 de la UNAM.

Fin de la versión en español

- González-Espinosa, M., Meave, J., Lorea-Hernández, F. G., Ibarra-Manríquez, G., & Newton, A. C. (2011). *The red list on Mexican cloud forest trees*. Cambridge, UK: Fauna and Flora International.
- Gray, P. A. (2005). Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: some examples. *The Forestry Chronicle*, 81(5), 655–661. doi: 10.5558/tfc81655-5
- Gual-Díaz, M., & González-Medrano, F. (2014). Los bosques mesófilos de montaña en México. In M. Gual-Díaz, & A. Rendón-Correa (Eds.), *Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo* (pp. 27–68). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso para la Biodiversidad.
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 179–188. doi: 10.7550/rmb.37737
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi: 10.1002/joc.1276
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, serie VI, escala 1:250000. Aguascalientes, México: Author.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: Author.
- James, S. A., Soltis, P. S., Belbin, L., Chapman, A. D., Nelson, G., Paul, D., & Collins, M. (2018). Herbarium data: global biodiversity

- and societal botanical needs for novel research. *Applications in Plant Sciences*, 6(2), e1024. doi: 10.1002/aps3.1024
- Jiménez-García, D., & Peterson, A. T. (2019). Climate change impact on endangered cloud forest tree species in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902781. doi: 10.22201/ib.20078706e.2019.90.2781
- Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Real, R. (2008). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 145–151. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00358.x
- Luna-Vega, I., Alcántara, O., Contreras-Medina, R., & Vargas, A. (2006). Biogeography, current knowledge and conservation of threatened vascular plants characteristic of Mexican temperate forests. *Biodiversity and Conservation*, 15(12), 3373–3799. doi: 10.1007/s10531-005-5401-1
- Luna-Vega, I., & Magallón, S. (2010). Phylogenetic composition of angiosperm diversity in the cloud forests of Mexico. *Biotropica*, 42(4), 444–454. doi: 10.1111/j.1744-7429.2009.00606.x
- Luna-Vega, I., Alcántara, O., Contreras-Medina, R., & Ríos-Muñoz, C. (2012). Ecological niche modeling on the effect of climatic change and conservation of *Ternstroemia lineata* DC. (Ternstroemiaceae) in Mesoamerica. *Botany*, 90(7), 637–650. doi: 10.1139/B2012-019
- Manzanilla-Quijada, G. E., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Yerena-Yamallel, J. I. & Manzanilla-Quiñones, U. (2020). Distribución potencial actual y futura e identificación de áreas aptas para la conservación de *Cedrela odorata* L. en la península de Yucatán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 391–408. doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.10.075
- Manzanilla-Quiñones, U., Delgado-Valerio, P., Hernández-Ramos, J., Molina-Sánchez, A., García-Magaña, J. J., & Rocha-Granados, M. C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y conservación. *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1398. doi: 10.21829/abm126.2019.1398
- Martínez-Meyer, E. (2012). Advances, limitations and synergies in predicting changes in species distribution and abundance under contemporary climate change. In E. Beever, & J. Belant. (Eds.), *Ecological consequences of climate change: mechanisms, conservation and management* (pp. 67–84). Boca Raton, USA: CRC Press.
- Martínez-Meyer, E., Díaz-Porras, D. F., Peterson, A. T., & Yañez-Arenas, C. (2013). Ecological niche structure and range wide abundance patterns of species. *Biology Letters*, 9(1), 20120637. doi: 10.1098/rsbl.2012.0637
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., & Tinoco-Rueda, J. A. (2013). Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 29–43. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.03.029
- Pearson, R. G., Raxworthy, C., Nakamura, M., & Peterson, A. T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 3(1), 102–117. doi: 10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x
- Pérez-Miranda, R., Romero-Sánchez, M. E., González-Hernández, A., Rosales-Mata, S., Moreno-Sánchez, F., & Arriola-Padilla, V. J. (2019). Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56), 218–237. doi: 10.29298/rmcf.v10i56.613
- Peterson A. T., Papes, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63–72. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Nueva Jersey, USA: Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Phillips, S. J., & Dudik, M. (2008). Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2), 161–175. doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V. H., Watson, J., Vanderwal, J., Fuller, R. A., Pressey, R. L., & Possingham, H. P. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change*, 2(6), 448–452. doi: 10.1038/NCLIMATE1453
- Ramírez-Toro, W., Torres-Miranda, A., González-Rodríguez, A., Ruiz-Sánchez, E., Luna-Vega, I., & Oyama, K. (2017). A multicriteria analysis for prioritizing areas for conservation of oaks (Fagaceae: *Quercus*) in Oaxaca, southern Mexico. *Tropical Conservation Science*, 10(1), 1–29. doi: 10.1177/1940082917714227
- Rzedowski, J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana*, 35, 25–44. doi: 10.21829/abm35.1996.955
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1.ª ed. digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Sánchez-Ramos, G., & Dirzo, R. (2014). El bosque mesófilo de montaña: un ecosistema prioritario amenazado. In M. Gual-Díaz, & A. Rendón-Correa (Eds.), *Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo* (pp. 109–137). Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, *Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Téllez-Valdés, O., & Dávila-Aranda, P. (2003). Protected areas and climate change: a case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Conservation Biology*, 17(3), 846–853. doi: 10.1046/j.1523-1739.2003.01622.x
- Torres-Alavez, A., Cavazos, T., & Turrent, C. (2014). Land-sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon

- under climate change conditions. *Journal of Climate*, 27(12), 4566–4580. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00557.1
- Torres-Colín, R. (2004). Tipos de vegetación. In A. García-Mendoza, M. J. Ordóñez, & M. Briones-Salas (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca* (pp. 105-117). Ciudad de México, México: Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza & World Wildlife Fund.
- Trejo-Vázquez, I. (2004). Clima. In A. García-Mendoza, M. J. Ordóñez, & M. Briones-Salas (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca* (pp. 67–85). Ciudad de México, México: Instituto de Biología, UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza & World Wildlife Fund.
- Vásquez-Morales, S. G., Téllez-Valdés, O., Pineda-López, M. R., Sánchez-Velásquez, L. R., Flores-Estévez, N., & Viveros-Viveros, H. (2014). Effect of climate change on the distribution of *Magnolia schiedeana*: a threatened species. *Botanical Sciences*, 92(4), 575–585. doi: 10.17129/botsoci.116
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. In J. Martínez, & A. Fernández (Eds.), *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 239–254). Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología.
- Villers-Ruiz, L., & Castañeda-Aguado, D. (2013). Species and plant community reorganization in the Trans-Mexican Volcanic Belt under climate change conditions. *Journal of Mountain Science*, 10(6), 923–931. doi: 10.1007/s11629-013-2719-0

