

Current and future potential distribution and identification of suitable areas for the conservation of *Cedrela odorata* L. in the Yucatan Peninsula

Distribución potencial actual y futura e identificación de áreas aptas para la conservación de *Cedrela odorata* L. en la península de Yucatán

Gyorgy E. Manzanilla-Quijada; Eduardo J. Treviño-Garza*; Oscar A. Aguirre-Calderón; José I. Yerena-Yamallel; Ulises Manzanilla-Quñones

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales.
Carretera Nacional km 145. C.P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Corresponding author: eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx; tel: +52 821 111 6476.

Abstract

Introduction: Red cedar (*Cedrela odorata* L.) is appreciated for its wood, a situation that has caused poor forest management and, therefore, a decrease in its areas of distribution.

Objective: To delimit the current and future potential distribution of *C. odorata* and to identify suitable seed-producing areas for the conservation of the species in the Yucatan Peninsula.

Materials and methods: Records of the presence of *C. odorata* were obtained from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF), the National Forest and Soil Inventory (INFyS in Spanish) and the book “Árboles tropicales de México”. The modeling was done in MaxEnt using current environmental variables and future (2030) climate change scenarios at 1 km² spatial resolution. Seventy-five percent of the records were used to train the models and 25 percent to validate them. The variables with the greatest contribution were determined by the jackknife test.

Results and discussion: The estimated current potential distribution of *C. odorata* was 404917 ha. Climate change simulations predict a reduction (31 to 44.8 %) of the suitable habitat, where the natural protected areas (ANPs) of Calakmul, Los Petenes and Ría Celestún would serve as climate refuges, conserving about 76472 ha. The important variables in the distribution were: vegetation (34.7 %), precipitation of the wettest month (14.6 %), edaphology (8.8 %), average temperature of the coldest quarter (8.6 %) and slope (7 %).

Conclusion: The models allowed the identification of suitable areas with habitat quality of *C. odorata*. In view of the threats of climate change, the distribution of *C. odorata* in ANPs would help conservation and restoration programs *in situ*.

Keywords: Climate change; red cedar; potential distribution; suitable habitat; spatial modelling.

Resumen

Introducción: El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) es apreciado por su madera, situación que ha ocasionado un mal manejo forestal y, por ende, la disminución de sus áreas de distribución.

Objetivo: Delimitar la distribución potencial actual y futura de *C. odorata* e identificar áreas idóneas productoras de semillas para la conservación de la especie en la península de Yucatán.

Materiales y métodos: Se obtuvieron registros de presencia de *C. odorata* de la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF), del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) y del libro “Árboles tropicales de México”. La modelación se realizó en MaxEnt utilizando variables ambientales actuales y de escenarios futuros (2030) de cambio climático a 1 km² de resolución espacial. Se empleó 75 % de los registros para entrenar los modelos y 25 % para validarlos. Las variables con mayor contribución se determinaron mediante la prueba *jackknife*.

Resultados y discusión: La distribución potencial actual estimada de *C. odorata* fue 404917 ha. Las simulaciones de cambio climático predicen reducción (31 a 44.8 %) del hábitat idóneo, donde las áreas naturales protegidas (ANP) de Calakmul, Los Petenes y Ría Celestún funcionarían como refugios climáticos, conservando cerca de 76472 ha. Las variables importantes en la distribución fueron: vegetación (34.7 %), precipitación del mes más húmedo (14.6 %), edafología (8.8 %), temperatura media del trimestre más frío (8.6 %) y pendiente (7 %).

Conclusión: Los modelos permitieron la identificación de áreas idóneas con calidad de hábitat de *C. odorata*. Ante las amenazas del cambio climático, la distribución de *C. odorata* en las ANP ayudaría a los programas de conservación y restauración *in situ*.

Palabras clave: Cambio climático; cedro rojo; distribución potencial; hábitat idóneo; modelación espacial.

Introduction

The relationship between biodiversity and climate has become a concern for the scientific community, due to the negative effects of climate change on vegetation (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Increases in temperature and changes in precipitation affect species in various ways, and these changes would modify their distribution, diversity, and abundance in the future (Burgmer, Hillerbrand, & Pfenninger, 2007; Saenz-Romero, Rehfeldt, Ortega-Rodríguez, Marin-Togo, & Madrigal-Sánchez, 2015).

Climate change scenarios for Mexico in the 21st century predict an increase in average annual temperature of 0.5 to 2 °C by 2030, 2.3 °C by 2060 and up to 3.7 °C by 2090 (Sáenz-Romero et al., 2010). These scenarios predict an increase in the area occupied by dry forests of 7.4 % from 2025 (Villers-Ruiz, & Trejo-Vázquez, 2000), while the tropical zones of the southeast such as the Selva el Ocote Biosphere Reserve would show an increase in average annual temperature of between 0.41 and 0.83 °C and a decrease in precipitation of 35 to 71 mm by 2030 (Manzanilla-Quñones & Aguirre-Calderón, 2017).

The Meliaceae family is a group of plants of great importance in the tropics, of which red cedar (*Cedrela odorata* L.) and mahogany (*Swietenia macrophylla* King) stand out as valuable woods (Mendizábal-Hernández, Alba-Landa, & Suárez-Dorantes, 2009; Pennington & Sarukhán, 2005; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016). *Cedrela odorata* is naturally distributed in an altitudinal range from 0 to 1200 m from Central America in Belize and Panama to South America in Venezuela, Colombia and part of the Amazon in Brazil and Peru (Salazar, Soihet, & Méndez, 2000). In Mexico, the species is located in southern Tamaulipas, southeast of San Luis Potosí, Sinaloa, Guerrero, the Central Depression, the coasts of Chiapas and the Yucatan Peninsula (Gómez, Monterroso, & Tinoco, 2007; Pennington & Sarukhán, 2005; Romo-Lozano, Vargas-Hernández, López-Upton, & Ávila-Ángulo, 2017).

Timber production in Mexico has fluctuated from 6.7 to 7 million cubic meters in logs (m³r) annually, where the main producing states are Durango (35.1 %), Chihuahua (13.2 %), Veracruz (7.8 %), Michoacán (6.7 %) and Oaxaca (5.9 %), which contributed 68.6 % of total production. Of this production, only 0.5% corresponds to precious woods such as mahogany and red cedar, with Campeche (18373 m³r), Chiapas (836 m³r), Jalisco (2784 m³r), Veracruz (4517 m³r) and Quintana Roo (4087 m³r) being the states with the highest timber production and which generated revenues of MXN 919406 up to MXN 18 373 000 (SEMARNAT, 2016, 2017).

Introducción

La relación entre la biodiversidad y el clima se ha vuelto motivo de preocupación para la comunidad científica, debido a los efectos negativos del cambio climático sobre la vegetación (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2014). El aumento en temperatura y los cambios en precipitación afectan de diversas maneras a las especies, por lo que estos cambios modificarían su distribución, diversidad y abundancia en el futuro (Burgmer, Hillerbrand, & Pfenninger, 2007; Sáenz-Romero, Rehfeldt, Ortega-Rodríguez, Marín-Togo, & Madrigal-Sánchez, 2015).

Los escenarios de cambio climático para México en el siglo XXI predicen un aumento en temperatura promedio anual de 0.5 a 2 °C para 2030, de 2.3 °C para 2060 y hasta 3.7 °C para 2090 (Sáenz-Romero et al., 2010). Dichos escenarios predicen un aumento del área ocupada por los bosques secos de 7.4 % a partir del 2025 (Villers-Ruiz, & Trejo-Vázquez, 2000), mientras que las zonas tropicales del sureste como la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote presentarían aumento en temperatura promedio anual entre 0.41 a 0.83 °C y disminución en la precipitación de 35 a 71 mm para 2030 (Manzanilla-Quñones & Aguirre-Calderón, 2017).

La familia Meliaceae constituye un grupo de plantas de gran importancia en los trópicos, de las cuales destacan el cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) y la caoba (*Swietenia macrophylla* King) por estar clasificadas como maderas valiosas (Mendizábal-Hernández, Alba-Landa, & Suárez-Dorantes, 2009; Pennington & Sarukhán, 2005; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016). *Cedrela odorata* se distribuye en un intervalo altitudinal de 0 a 1200 m de manera natural desde Centroamérica en Belice y Panamá, hasta Sudamérica en Venezuela, Colombia y parte de la Amazonia en Brasil y Perú (Salazar, Soihet, & Méndez, 2000). En México, la especie se localiza en el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí, Sinaloa, Guerrero, la Depresión Central, las costas de Chiapas y la península de Yucatán (Gómez, Monterroso, & Tinoco, 2007; Pennington & Sarukhán, 2005; Romo-Lozano, Vargas-Hernández, López-Upton, & Ávila-Ángulo, 2017).

La producción forestal maderable en México ha fluctuado de 6.7 a 7 millones de metros cúbicos en rollo (m³r) anuales, donde los principales estados productores son Durango (35.1 %), Chihuahua (13.2 %), Veracruz (7.8 %), Michoacán (6.7 %) y Oaxaca (5.9 %), los cuales contribuyeron con 68.6 % de la producción total. De esta producción, solo 0.5 % corresponde a maderas preciosas como la caoba y el cedro rojo, siendo Campeche (18 373 m³r), Chiapas (836 m³r), Jalisco (2784 m³r), Veracruz (4517 m³r) y Quintana Roo (4087 m³r), los estados con mayor producción maderable

Currently, after mahogany, red cedar is the most important timber species in the forest industry in Mexico (Pennington & Sarukhán, 2005; SEMARNAT, 2016). Red cedar has been a species of high economic value, since its wood is considered fine and aesthetically precious, for the manufacture of fine luxury furniture, veneer, and cabinetmaking. Due to the excellent quality of the wood, red cedar has been selectively cut in tropical forests for multiple uses, which has resulted in the larger diameter and straight shaft trees being scarce in today's natural populations.

Due to poor forest management of *C. odorata*, the species has fragmented its habitat and reduced its natural populations significantly (Rodríguez et al., 2003). This situation has caused the red cedar to be included in the Official Mexican Standard NOM-059 as a species subject to special protection (SEMARNAT, 2010) and in Appendix III of the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES, 2011) so from February 2011, in order to make any kind of use, a series of legal procedures must be followed. These involve obtaining permits in which population studies, sampling, and specifications for restoration, repopulation, and reintroduction programs, projects, or activities must be attached (Ruiz-Jiménez, De los Santos-Posadas, Parraguirre-Lezama, & Saavedra-Millán, 2018).

Researchers have used Geographic Information Systems (GIS) and ecological niche modeling algorithms to generate habitat quality suitability maps to identify geographic areas with potential for restoration or conservation activities for species of ecological and economic interest (Garza-López et al., 2016; Manzanilla et al., 2019). The use of programs for ecological niche modeling such as GARP (genetic algorithm), BIOCLIM (climate envelope algorithm) and MaxEnt (maximum entropy algorithm) have allowed the prediction of species distribution areas with good statistical probability (Franklin, 2010; Peterson, 2011; Phillips & Dudík, 2008). These algorithms allow the identification of areas with favorable biotic and abiotic conditions, both for the conservation of a taxon and for the establishment of areas suitable for species with high ecological and economic value such as *C. odorata* (Morales, 2012; Perosa et al., 2014; Soberón, Osorio-Olvera, & Peterson, 2017). The delimitation of these areas is based on the environmental zoning carried out on the basis of an exploratory analysis of eco-geographical variables (latitude, longitude, altitude, slope, climate and soil) (Castellanos-Acuña et al., 2018).

In order to have elements to make decisions for the management and conservation of *C. odorata* in the Yucatan Peninsula, the objective of this work was to delimit the potential current and future distribution (2030), as well as to identify and propose areas with environmental and morphological characteristics suitable for the conservation and production of seeds.

y los cuales generaron ingresos de 919 406 MXN hasta 18 373 000 MXN (SEMARNAT, 2016).

Actualmente, después de la caoba, el cedro rojo es la especie maderable más importante en la industria forestal de México (Pennington & Sarukhán, 2005; SEMARNAT, 2016). El cedro rojo ha sido una especie de alto valor económico, ya que su madera se considera fina y estéticamente preciosa, para la fabricación de muebles finos de lujo, chapa y ebanistería. Debido a la excelente calidad de la madera, el cedro rojo se ha cortado selectivamente en los bosques tropicales para usos múltiples, lo que ha ocasionado que los árboles de mayor diámetro y fuste recto sean escasos en las poblaciones naturales actuales.

Debido al mal manejo forestal de *C. odorata*, la especie ha fragmentado su hábitat y reducido sus poblaciones naturales de manera significativa (Rodríguez et al., 2003). Dicha situación ha ocasionado que el cedro rojo se incluya en la Norma Oficial Mexicana NOM-059 como especie sujeta a protección especial (SEMARNAT, 2010) y en el Apéndice III de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2011), por lo que, a partir de febrero de 2011, para realizar cualquier tipo de aprovechamiento, se debe cumplir con una serie de procedimientos legales. Estos implican la obtención de permisos en los que se deben anexar estudios poblacionales, muestreos y especificaciones sobre los programas, proyectos o actividades de restauración, repoblación y reintroducción (Ruiz-Jiménez, De los Santos-Posadas, Parraguirre-Lezama, & Saavedra-Millán, 2018).

Los investigadores han empleado Sistemas de Información Geográfica (SIG) y algoritmos de modelamiento de nicho ecológico para generar mapas de idoneidad de calidad de hábitat y así identificar zonas geográficas con potencial para actividades de restauración o conservación de especies de interés ecológico y económico (Garza-López et al., 2016; Manzanilla et al., 2019). El uso de programas para el modelado de nicho ecológico como GARP (algoritmo genético), BIOCLIM (algoritmo de envolturas climáticas) y MaxEnt (algoritmo de máxima entropía) han permitido la predicción de áreas de distribución de especies con buena probabilidad estadística (Franklin, 2010; Peterson, 2011; Phillips & Dudík, 2008). Estos algoritmos permiten la identificación de áreas con las condiciones bióticas y abióticas favorables, tanto para la conservación de un taxón como para el establecimiento de zonas aptas para especies con alto valor ecológico y económico como es el caso de *C. odorata* (Morales, 2012; Perosa et al., 2014; Soberón, Osorio-Olvera, & Peterson, 2017). La delimitación de dichas áreas se basa en la zonificación ambiental realizada a partir de un análisis exploratorio de variables ecogeográficas (latitud,

Materials and methods

The study area is located in the Yucatan Peninsula, situated in southeast Mexico between 22° 31' 43" and 17° 48' 51" LN and 92° 20' 11" and 86° 42' 36" LO; it covers the states of Campeche, Quintana Roo and Yucatan, and has an area of 139 840 km² (Figure 1). The relief is flat with an average altitude of 50 m and only in the center-south there are elevations of up to 350 m (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015). The dominant climate is Aw₁(x') warm sub-humid with an average annual temperature of more than 22 °C and with annual accumulated precipitation intervals of 700 to 1600 mm (Cuervo-Robayo et al., 2014; García 1998).

Data collection

Two hundred twenty-seven records of *C. odorata* were obtained from the databases of the National Forest and Soil Inventory (INFyS) 2004-2009 (CONAFOR, 2009), the book "Árboles tropicales de México" (Pennington & Sarukhán, 2005) and the Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017) (Figure 1).

longitud, altitud, pendiente, clima y suelo) (Castellanos-Acuña et al., 2018).

Para contar con elementos que permitan tomar decisiones para el manejo y conservación de *C. odorata* en la península de Yucatán, el objetivo planteado en este trabajo fue delimitar la distribución potencial actual y futura (2030), así como identificar y proponer áreas con características ambientales y morfológicas idóneas para la conservación y producción de semillas.

Materiales y métodos

El área de estudio se localiza en la península de Yucatán, ubicada en el sureste de México entre los 22° 31' 43" y 17° 48' 51" LN y los 92° 20' 11" y 86° 42' 36" LO; abarca los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, y tiene una superficie de 139 840 km² (Figura 1). El relieve es plano con altitud promedio de 50 m y solo en el centro-sur se encuentran elevaciones de hasta 350 m (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2015). El clima dominante es del tipo Aw₁(x') cálido subhúmedo con temperatura promedio anual mayor de 22 °C y con intervalos en

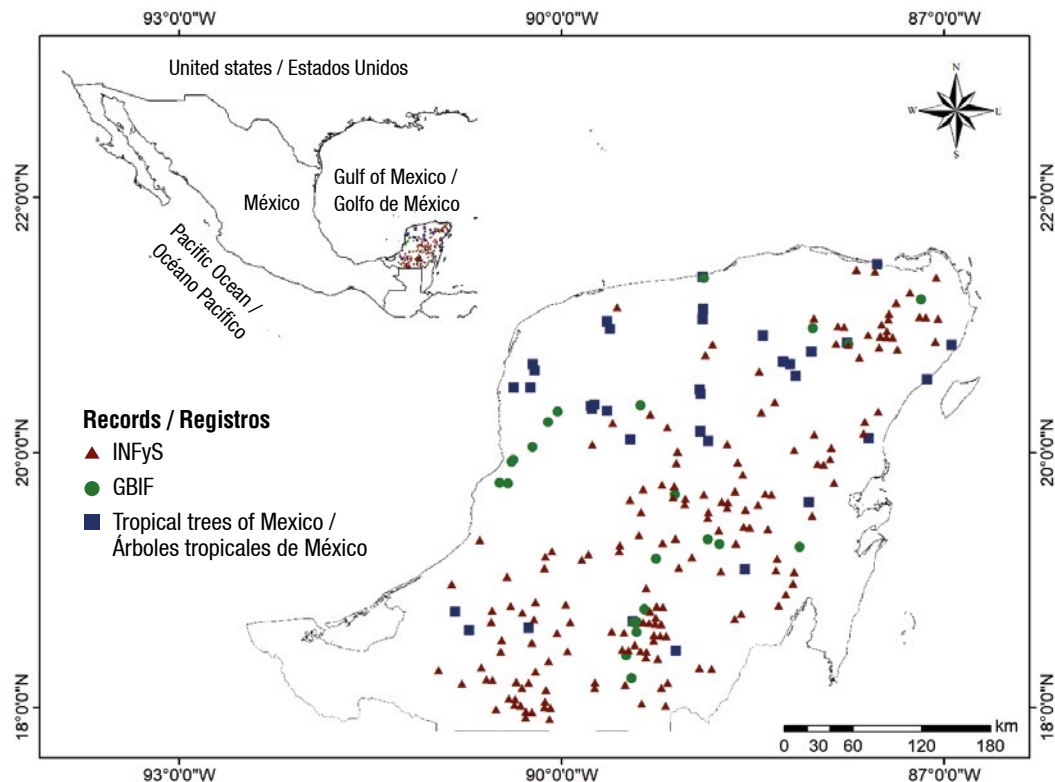


Figure 1. Study area and records of the presence of *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula. Data from the National Forest and Soil Inventory (INFyS) 2004-2009 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2009), from the book "Árboles tropicales de México" (Pennington & Sarukhán, 2005) and from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017).

Figura 1. Área de estudio y registros de presencia de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán. Datos del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) 2004-2009 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2009), del libro "Árboles tropicales de México" (Pennington & Sarukhán, 2005) y de la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017).

The databases were purified leaving a record per cell of 1 km² (30 arc seconds), their correct position was checked, eliminating duplicated records, badly georeferenced, as well as those located in urban areas and water bodies. These procedures were carried out on the Niche ToolBox platform of the Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Osorio-Olvera, Vijay, Narayani, Soberón, & Falconi, 2016) and in the ArcMap program version 10.3 (Environmental Scientific Research Institute [ESRI], 2014). After the debugging process, 216 valid records were obtained for the calibration of the models. For a better evaluation of the data, 50 models with different modeling criteria were generated (Table 1).

Current and future bioclimatic variables

The 19 bioclimatic variables (<http://visualcrow.com/descarga-mexico.html>) generated for Mexico for the period 1910-2009 were downloaded (Cuervo-Robayo et al., 2014). For the evaluation of the potential distribution in the future (2030), the bioclimatic variables of the general circulation models GFDL_CM3 and MIROC_ESM (http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/) projected to the near future (2030), which simulate radioactive forcing trajectories, in greenhouse gas emissions, similar to the current ones (RCP 4.5 W·m⁻²) were used. These bioclimatic variables have a resolution of one km² (30 arc seconds); in addition, the slope (%), orientation (°) and altitude (m) variables obtained from the digital elevation model with a resolution of 90 m in GeoTIFF format were included. The type of vegetation was obtained from the series VI “Land use and vegetation” of INEGI (2016) with a scale of 250 m. The edaphology (soil type) of the series I “Edaphological vector data set”, with a scale of 250 m, was obtained from CONABIO (1995). These last two variables were downloaded in vector format (shapefile). All variables were standardized and transformed into ASCII format at a scale of 1 km² (30 arc seconds) with the help of ArcMap version 10.3 (ESRI, 2014).

precipitación acumulada anual de 700 a 1600 mm (Cuervo-Robayo et al., 2014; García 1998).

Obtención de datos

Se obtuvieron 227 registros de *C. odorata* a partir de las bases de datos del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) 2004-2009 (CONAFOR, 2009), del libro de “Árboles tropicales de México” (Pennington & Sarukhán, 2005) y de la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2017) (Figura 1). Las bases de datos se depuraron dejando un registro por celda de 1 km² (30 segundos de arco), se revisó su correcta posición, eliminando registros duplicados, mal georreferenciados, así como los ubicados en zonas urbanas y cuerpos de agua. Estos procedimientos se realizaron en la plataforma Niche ToolBox de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Osorio-Olvera, Vijay, Narayani, Soberón, & Falconi, 2016) y en el programa ArcMap versión 10.3 (Environmental Scientific Research Institute [ESRI], 2014). Posterior al proceso de depuración, 216 registros válidos se obtuvieron para la calibración de los modelos. Para una mejor evaluación de los datos, se generaron 50 modelos con diferentes criterios de modelación (Cuadro 1).

Variables bioclimáticas actuales y futuras

Se descargaron las 19 variables bioclimáticas (<http://visualcrow.com/descarga-mexico.html>) generadas para México del periodo 1910-2009 (Cuervo-Robayo et al., 2014). Para la evaluación de la distribución potencial a futuro (2030), se utilizaron las variables bioclimáticas de los modelos de circulación general GFDL_CM3 y MIROC_ESM (http://www.ccafs-climate.org/data_spatial_downscaling/) proyectados a futuro cercano (2030), los cuales simulan trayectorias de forzamiento radiactivo, en las emisiones de gases de efecto invernadero, similares a las actuales (RCP 4.5 W·m⁻²). Estas variables bioclimáticas tienen una resolución de un km² (30 segundos de arco); además, se incluyeron

Table 1. Table 1. Data used in the potential distribution of *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula.

Cuadro 1. Datos utilizados en la modelación de distribución potencial de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán.

Models/ Modelos	Source/Fuente	Data/ Datos
10	National Forest and Soil Inventory (INFyS)	166
10	Global Biodiversity Information Facility (GBIF) and <i>Árboles tropicales de México</i>	50
10	GBIF, <i>Árboles tropicales de México</i> and INFyS	216
10	GBIF, <i>Árboles tropicales de México</i> and INFyS 25 %	91
10	GBIF, <i>Árboles tropicales de México</i> and INFyS 50 %	133

Delimitation of the area M

The variables were adjusted to the size of the spatial modeling area M (Yucatan Peninsula), which has been described as the space where a species is or is assumed to be, based on biological knowledge and its ability to disperse (Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, & Jaramillo-Correa, 2016; Soberón & Peterson, 2005). From area M, environmental variables were cut and adjusted to the same 1 km² pixel size (30 arc seconds) with the help of ArcMap version 10.3 (ESRI, 2014).

Modeling of current and future potential distribution

The models were generated in the MaxEnt algorithm version 3.3.3k, which uses an exploratory technique and identifies sites with similar values according to the principle of maximum entropy (Phillips, Anderson, & Schaphire, 2006). This algorithm is one of the most efficient for modeling species distribution using presence data only (Elith et al., 2011). In order to increase the reliability of the MaxEnt results, 50 distribution models were generated and tested under 10 modeling criteria (Table 2) using different threshold application rules and a maximum number of replications of 1000, with a convergence limit of 0.00001 (Manzanilla et al., 2019; Phillips et al., 2006). This made it possible to determine which model best fits and explains the current distribution of the species.

The models were calibrated using 75 % of the species presence data in csv format, selected at random to train the models, and the remaining 25 % for the validation test (Alba-Sánchez et al., 2010; Martínez-Méndez et al., 2016; Phillips et al., 2006). The relative contribution (%) of each variable in the models was estimated using the jackknife test (Shcheglovitova & Anderson, 2013). The output was of the logistic type, which indicates an index of similarity (probabilistic) of suitable conditions for the species with values from 0 to 1, where values close to 1 indicate suitable conditions for the development and presence of the species (Coitiño, Montenegro, Fallabrino, González, & Hernández, 2013; Phillips et al., 2006).

To generate the future model (2030), the parameters of the current distribution model with the best fit and statistical performance were transferred to the MaxEnt program (Morrone & Escalante, 2016).

Model validation

The models were evaluated by means of the Area Under the Curve (AUC) test, which is obtained directly from the Receiver Operating Characteristic (ROC) technique (Coitiño et al., 2013; Phillips et al., 2006); however, this

las variables pendiente (%), orientación (°) y altitud (m), obtenidas a partir del modelo digital de elevación con una resolución de 90 m en formato GeoTIFF. El tipo de vegetación se obtuvo de la serie VI “Uso de suelo y vegetación” del INEGI (2016) con una escala de 250 m. La edafología (tipo de suelo) de la serie I “Conjunto de datos vectoriales edafológico”, con una escala de 250 m, se obtuvo de la CONABIO (1995). Estas últimas dos variables se descargaron en formato vectorial (shapefile). Todas las variables se estandarizaron y transformaron en formato ASCII a una escala de 1 km² (30 segundos de arco) con ayuda del programa ArcMap versión 10.3 (ESRI, 2014).

Delimitación del área M

Las variables se ajustaron al tamaño del área de modelación espacial M (península de Yucatán), el cual se ha descrito como el espacio donde una especie está o se asume que podría estar, con base en el conocimiento biológico y de su capacidad de dispersión (Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, & Jaramillo-Correa, 2016; Soberón & Peterson, 2005). A partir del área M, las variables ambientales se recortaron y ajustaron a un mismo tamaño de píxel de 1 km² (30 segundos de arco) con ayuda del programa ArcMap versión 10.3 (ESRI, 2014).

Modelado de la distribución potencial actual y futura

Los modelos se generaron en el algoritmo MaxEnt versión 3.3.3k, el cual usa una técnica exploratoria e identifica sitios con valores similares de acuerdo con el principio de máxima entropía (Phillips, Anderson, & Schaphire, 2006). Este algoritmo es uno de los más eficientes para modelar la distribución de especies utilizando solo datos de presencia (Elith et al., 2011). Con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados de MaxEnt, 50 modelos de distribución se generaron y probaron bajo 10 criterios de modelación (Cuadro 2), utilizando diferentes reglas de aplicación de umbral y un número máximo de réplicas de 1000, con un límite de convergencia de 0.00001 (Manzanilla et al., 2019; Phillips et al., 2006). Esto permitió determinar cuál modelo se ajusta y explica mejor la distribución actual de la especie.

Los modelos se calibraron empleando 75 % de los datos de presencia de la especie en formato csv, seleccionados al azar para entrenar los modelos, y 25 % restante para la prueba de validación (Alba-Sánchez et al., 2010; Martínez-Méndez et al., 2016; Phillips et al., 2006). La contribución relativa (%) de cada variable en los modelos se estimó mediante la prueba de *jackknife* (Shcheglovitova & Anderson, 2013). La salida fue del tipo logística, el cual indica un índice de similitud (probabilístico) de condiciones idóneas para la especie

Table 2. Parameters used in the generation of distribution models for *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula.**Cuadro 2. Parámetros empleados en la generación de los modelos de distribución de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán.**

Model/ Modelo	Internal replication/ Replicado interno	Model/ Modelo	Internal replication/ Replicado interno	Application Rule Threshold/ Regla de aplicación de umbral	Replicas/ Réplicas
M1	Bootstrap	M6	Cross validation/ Validación cruzada	Equal training sensitivity and specificity/ Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales	1000
M2	Bootstrap	M7	Cross validation/ Validación cruzada	Maximum training sensitivity plus specificity/ Máxima sensibilidad de entrenamiento más especificidad	1000
M3	Bootstrap	M8	Cross validation/ Validación cruzada	Equal test sensitivity and specificity/ Igual sensibilidad y especificidad de prueba	1000
M4	Bootstrap	M9	Cross validation/ Validación cruzada	Maximum test sensitivity plus specificity/ Máxima sensibilidad de prueba más especificidad	1000
M5	Bootstrap	M10	Cross validation/ Validación cruzada	Without threshold rule application/ Sin aplicación de regla de umbral	500

validation has been questioned because it does not consider true absence data (Peterson, Papes, & Soberón, 2008). Therefore, it was necessary to perform a more robust analysis using a partial ROC test in the Tool for Partial-ROC version 1.0 program (Narayani, 2008), which was designed to counteract the shortcomings of the AUC (Peterson et al., 2008).

Partial ROC analyses were performed on 50 % of the records with 95 % reliability, with 1000 iterations by bootstrapping and fixing a 5 % error of omission. The test generates values from 1 to 2; the closer it is to 2, the more reliable the model is (Martínez-Mendez et al., 2016; Peterson et al., 2008). Also, a Z test was performed, where the calculated Z value of the AUC proportions of partial ROC must be greater than the Z value of tables ($Z > 2.3 = 99\%$), which provided greater support to the models ($P < 0.01$) (Martínez-Méndez et al., 2016; Monterrubio-Rico et al., 2016).

Potential areas of distribution

The values of the logistic output of the model with the best statistical fit were reclassified into three categories of habitat quality with equal intervals (low, medium and high), through the reclass module of the ArcMap 10.3 program (ESRI, 2014). The value of the high habitat quality category was used to transform the models

con valores de 0 a 1, donde valores cercanos a 1 indican condiciones idóneas para el desarrollo y presencia de la especie (Coitiño, Montenegro, Fallabrino, González, & Hernández, 2013; Phillips et al., 2006).

Para generar la modelación a futuro (2030), los parámetros del modelo de distribución actual con el mejor ajuste y desempeño estadístico se transfirieron al programa MaxEnt (Morrone & Escalante, 2016).

Validación de los modelos

Los modelos se evaluaron por medio de la prueba del área bajo la curva (AUC), la cual se obtiene directamente de la técnica *Receiver Operating Characteristic* (ROC estándar) (Coitiño et al., 2013; Phillips et al., 2006); no obstante, esta validación ha sido cuestionada por no considerar datos de ausencias verdaderas (Peterson, Papes, & Soberón, 2008). Por tanto, fue necesario realizar un análisis de mayor robustez mediante una prueba de ROC parcial en el programa Tool for Partial-ROC versión 1.0 (Narayani, 2008), la cual fue diseñada para contrarrestar las deficiencias del AUC (Peterson et al., 2008).

Los análisis ROC parcial se realizaron con 50 % de los registros con una confiabilidad de 95 %, con 1000 iteraciones mediante un remuestreo por *bootstrap* y fijando un error de omisión de 5 %. La prueba

from continuous to binary (fit and unfit). Based on the reclassification, the area occupied by the potential distribution areas of *C. odorata* was estimated for the current and future periods.

Conservation and seed production areas

The conservation and seed production areas were selected based on the identification and delimitation of the areas with the highest habitat quality in the current and future periods. An additional criterion for determining locations with the possibility of serving as a climatic refuge for the conservation of the species was the location of natural protected areas (ANPs) (SEMARNAT & Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2017), whose boundaries were used and combined with the areas of distribution determined for both periods.

The selection of suitable areas for seed production was based on the evaluation of stand quality (Huang, Titus, & Wiens, 1992), which reflects the productive capacity of the sites through the dominant height of the trees and the diameter-height ratio. Based on the proposals of Huang et al. (1992) and Yuancai and Parresol (2001), it has been observed that sites with larger diameter trees tend to have a greater dominance in total height. The suitable areas for seed production were identified through the INFyS maximum diameter data in raster format, from the data obtained from the 400 m² rectangular sampling clusters, designed for forests (CONAFOR, 2009). This file was transformed to vector format in the ArcMap 10.3 program (ESRI, 2014); subsequently, the polygons of the current and future distribution were used to identify the areas where the species is found. Finally, the areas for seed production were chosen based on the reclassification of the values of the diameter category ≥ 50 cm; according to Huang et al. (1992) and Yuancai and Parresol (2001), this value would correspond to a tree of 20 m in height, which would be in the reproductive stage.

Results and discussion

The results of the current AUC models recorded values of 0.893 for training data and 0.805 for validation, while for the future models, GFDL_CM3 and MIROC_ESM, the values were 0.962 to 0.957 for training data and 0.731 to 0.751 for validation data. The models generated for the current and future periods had a good predictive performance as a function of the AUC, better than a randomly generated model. According to Araújo and Guisan (2006), Peterson (2011), and Miranda, Geada, and Sotolongo (2016), AUC values close to or equal to 0.50 show equal or worse performance than a randomly generated model, while 0.60-0.70 are considered bad, 0.71-0.80 regular, 0.81-0.90 good, and >0.90 are considered excellent.

genera valores de 1 a 2; mientras más se aproxime a 2, el modelo será más confiable (Martínez-Méndez et al., 2016; Peterson et al., 2008). Asimismo, se realizó una prueba de Z, donde el valor Z calculado de las proporciones AUC de ROC parcial debe ser mayor al valor Z de tablas ($Z > 2.3 = 99\%$), lo cual brindó un mayor soporte a los modelos ($P < 0.01$) (Martínez-Méndez et al., 2016; Monterrubio-Rico et al., 2016).

Áreas de distribución potencial

Los valores de la salida logística del modelo con el mejor ajuste estadístico se reclasificaron en tres categorías de calidad de hábitat con intervalos iguales (baja, media y alta), a través del módulo *reclass* del programa ArcMap 10.3 (ESRI, 2014). El valor de la categoría de calidad de hábitat alta se utilizó para transformar los modelos de continuos a binarios (apto y no apto). Con base en la reclasificación, la superficie ocupada por las áreas de distribución potencial de *C. odorata* se estimó para los periodos actual y futuro.

Áreas de conservación y producción de semillas

Las áreas de conservación y de producción de semillas se seleccionaron con base en la identificación y delimitación de las áreas de mayor calidad de hábitat de los periodos actual y futuro. Un criterio adicional para determinar localidades con posibilidad de servir como refugio climático, para la conservación de la especie, fue la ubicación de las áreas naturales protegidas (ANP) (SEMARNAT & Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2017), cuyos límites se utilizaron y combinaron con las áreas de distribución determinadas para ambos periodos.

La selección de las áreas idóneas para la producción de semillas se basó en la evaluación de la calidad de estacion de los rodales (Huang, Titus, & Wiens, 1992), los cuales reflejan la capacidad productiva de los sitios a través de la altura dominante de los árboles y de la relación alométrica diámetro-altura. Con base en lo propuesto por Huang et al. (1992) y Yuancai y Parresol (2001) se ha observado que los sitios con árboles de diámetros mayores suelen presentar dominancia en altura total, por lo que, acorde con lo reportado en la literatura, los sitios con mayores diámetros tendrían, teóricamente, mayor rendimiento en la producción de semillas. Las áreas idóneas para la producción de semillas se identificaron mediante los datos del diámetro máximo en formato *raster* del INFyS, a partir de los datos obtenidos de los conglomerados rectangulares de muestreo de 400 m², diseñados para selvas (CONAFOR, 2009). Dicho archivo se transformó a formato vectorial en el programa ArcMap 10.3 (ESRI, 2014); posteriormente, los polígonos de la distribución actual y futura se utilizaron para identificar las áreas donde la especie se encuentra. Finalmente, las áreas

The models with the best statistical performance were the 10 models generated from the 50 records of the GBIF and “Árboles tropicales de México” databases. Of these, the one that presented the best fit and statistical performance was model 7 (M7VC); this result was corroborated by the partial ROC and Z tests, which were statistically significant ($P < 0.01$) (Table 3).

Relevant variables

The jackknife test indicated that the variables with the greatest contribution in the generation of the current distribution models of *C. odorata* were vegetation with 34.7 %, followed by the precipitation of the wettest month with 14.6 %, edaphology with 8.8 %, average temperature of the coldest quarter with 8.6 % and slope with 7 %. In the analysis of the potential future distribution of the GFDL_CM3 and MIROC_ESM models, the most relevant environmental variables were vegetation with 84 % and 83.7 %, mean temperature of the coldest quarter with 6.5 % and 9 %, and edaphology with 2.8 % and 2.5 %, respectively (Figure 2). These variables determine the current and future (2030) ecological niche of the species in the Yucatan Peninsula.

According to the contribution of the environmental variables, *C. odorata* requires Leptosol type soils with precipitation in the wettest month of 216 mm and oscillation in the average temperature of the coldest quarter of 22 to 24 °C. The species has a preference for ecosystems with secondary tree and shrub vegetation of medium deciduous, sub-deciduous, evergreen and sub-perennial forests. These results are consistent with the

para la producción de semillas se eligieron con base en la reclasificación de los valores de la categoría diamétrica ≥ 50 cm; acorde con Huang et al. (1992) y Yuancai y Parresol (2001), ese valor correspondería a un árbol de 20 m de altura, el cual se encontraría en etapa reproductiva.

Resultados y discusión

Los resultados de los modelos actuales del AUC registraron valores de 0.893 para los datos de entrenamiento y de 0.805 para la validación, mientras que para los modelos a futuro, GFDL_CM3 y MIROC_ESM, los valores fueron de 0.962 a 0.957 en los datos de entrenamiento y de 0.731 a 0.751 para los de validación. Los modelos generados para los periodos actual y futuro tuvieron un buen desempeño predictivo en función del AUC, mejor que un modelo generado al azar. De acuerdo con Araújo y Guisan (2006), Peterson (2011), y Miranda, Geada, y Sotolongo (2016), los valores del AUC cercanos o iguales a 0.50 presentan un desempeño igual o peor que un modelo generado al azar, mientras que 0.60-0.70 se consideran malos, 0.71-0.80 regulares, 0.81-0.90 buenos y >0.90 se consideran excelentes.

Los modelos que presentaron el mejor desempeño estadístico fueron los 10 modelos generados a partir de los 50 registros de las bases de datos del GBIF y de “Árboles tropicales de México”. De estos, el que presentó mejor ajuste y desempeño estadístico fue el modelo 7 (M7VC); este resultado se corroboró por medio de las pruebas ROC parcial y Z, las cuales fueron estadísticamente significativas ($P < 0.01$) (Cuadro 3).

Table 3. Statistical results of current and future potential distribution models of *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula. Cuadro 3. Resultados estadísticos de los modelos de distribución potencial actual y futura de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán.

Period/ Periodo	Models/ Modelos	Average radii partial ROC/ Promedio radios ROC parcial	Standard deviation/ Desviación estándar	Z Test/ Prueba de Z
Current/ Actual	M1B	1.447	0.106	$P < 0.01$
	M2B	1.550	0.110	$P < 0.01$
	M3B	1.552	0.112	$P < 0.01$
	M4B	1.549	0.113	$P < 0.01$
	M5B	1.531	0.112	$P < 0.01$
	M6CV	1.533	0.112	$P < 0.01$
	M7CV	1.554	0.106	$P < 0.01$
	M8CV	1.546	0.112	$P < 0.01$
	M9CV	1.538	0.111	$P < 0.01$
	M10CV	1.533	0.114	$P < 0.01$
Future/ Futura	GFDL_CM3	1.111	0.119	$P < 0.01$
	MIROC_ESM	1.111	0.087	$P < 0.01$

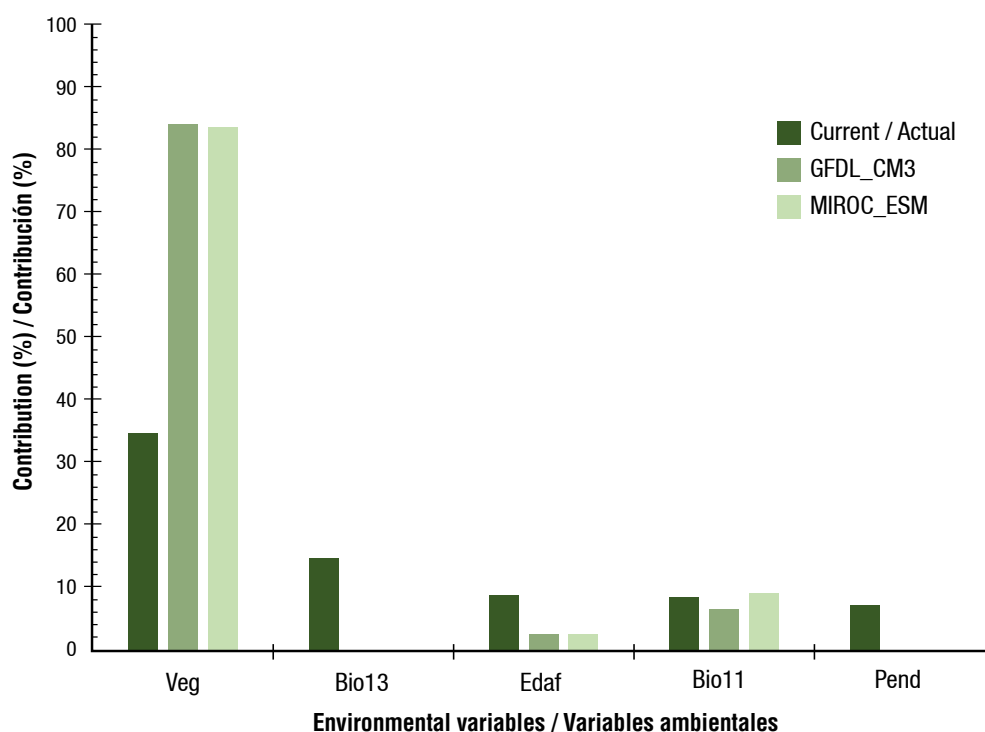


Figure 2. Contribution of environmental variables to the current and future (2030) distribution of *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula. Veg = vegetation, Bio13 = precipitation of the wettest month, Edaf = edaphology, Bio11 = average temperature of the coldest quarter, Pend = slope.

Figura 2. Contribución de las variables ambientales en la distribución actual y futura (2030) de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán. Veg = vegetación, Bio13 = precipitación del mes más húmedo, Edaf = edafología, Bio11 = temperatura media del trimestre más frío, Pend = pendiente.

environmental requirements of a tropical forest species, which have been described in the literature, providing a degree of confidence that the species is found in areas congruent with sites with habitat conditions similar to those described by Rodríguez (2003), and Pennington and Sarukhán (2005). The results of the environmental variables already mentioned are similar to those reported by Gómez et al. (2007) and Garza-López et al. (2016), who mention that tropical species such as red cedar and mahogany tend to develop better during the dry seasons (no longer than four months), in sites with average annual temperatures of 24 to 28 °C, maximum temperature of the hottest month of 24 to 32 °C and minimum temperature of the coldest month of 11 to 22 °C. Andrade and Solis (2004) point out that *C. odorata* is both a secondary and a primary species, because it is usually a pioneer in areas of secondary vegetation in medium and high forests, and also as a frequent element in the upper stratum of mature forests. Salazar et al. (2000) mention that *C. odorata* requires annual rainfall of 1 200 to 2 500 mm and an altitudinal gradient of 0 to 1 500 m for its optimal development and growth, conditions that are located within the densest forested areas towards the southeast of the Yucatan peninsula. The most relevant variables for the future (2030), in both evaluated models, were vegetation,

VARIABLES RELEVANTES

La prueba *jackknife* indicó que las variables con mayor contribución en la generación de los modelos de distribución actual de *C. odorata* fueron la vegetación con 34.7 %, seguido de la precipitación del mes más húmedo con 14.6 %, edafología con 8.8 %, temperatura media del trimestre más frío con 8.6 % y pendiente con 7 %. En el análisis de la distribución potencial a futuro de los modelos GFDL_CM3 y MIROC_ESM, las variables ambientales más relevantes fueron la vegetación con 84 % y 83.7 %, temperatura media del trimestre más frío con 6.5 % y 9 %, y edafología con 2.8 % y 2.5 %, respectivamente (Figura 2). Estas variables son las que determinan el nicho ecológico actual y a futuro (2030) de la especie en la península de Yucatán.

De acuerdo con la contribución de las variables ambientales, *C. odorata* requiere suelos del tipo Leptosol con precipitación del mes más húmedo de 216 mm y oscilación en la temperatura media del trimestre más frío de 22 a 24 °C. La especie tiene preferencia por los ecosistemas con vegetación secundaria arbórea y arbustiva de selvas medianas caducifolias, subcaducifolias, perennifolias y subperennifolias. Estos resultados concuerdan con los requerimientos

soil and average temperature of the coldest quarter, which remained as the main determining variables in the distribution of the species. This indicates that changes or alterations in the vegetation associated with *C. odorata* would have a great impact on the species' future distribution areas.

Current and future potential distribution

The results indicate a current potential distribution of *C. odorata* of 405 065 ha, equivalent to 2.9 % of the study area, where this area meets the highest environmental conditions of habitat quality, suitable for the species. The average habitat quality represents an area of 19.2 % and the low habitat quality represents 77.9 %, which represents marginal areas of almost no suitability. The results of this classification allowed us to generate a map of the current habitat quality available for *C. odorata* in the Yucatan Peninsula (Figure 3).

On the other hand, the results of the future models GFDL_CM3 and MIROC_ESM, projected to 2030, estimate a potential suitable area of 277 037 and 226 138 ha, equivalent to 1.6 and 2 % of the study area, respectively. These results represent a significant reduction between 31 and 44.8 % of the suitable habitat for the species with respect to its estimated current potential distribution (Figure 4).

ambientales de una especie forestal de zonas tropicales, los cuales han sido descritos en la literatura, lo que brinda un grado de confiabilidad de que la especie se encuentra en áreas congruentes a sitios con condiciones de hábitat similares a las descritas por Rodríguez (2003), y Pennington y Sarukhán (2005). Los resultados de las variables ambientales ya mencionadas son similares a los reportados por Gómez et al. (2007) y Garza-López et al. (2016), quienes mencionan que las especies tropicales como cedro rojo y caoba suelen desarrollarse mejor durante las estaciones secas (no mayores a cuatro meses), en sitios con temperatura media anual de 24 a 28 °C, temperatura máxima del mes más cálido de 24 a 32 °C y temperatura mínima del mes más frío de 11 a 22 °C. Andrade y Solís (2004) señalan a *C. odorata* como una especie secundaria y primaria a la vez, debido a que suele ser pionera en zonas de vegetación secundaria en selvas medianas y altas, y también como elemento frecuente en el estrato superior de las selvas maduras. Salazar et al. (2000) mencionan que *C. odorata* requiere precipitaciones de 1200 a 2500 mm anuales y un gradiente altitudinal de 0 hasta 1500 m para su óptimo desarrollo y crecimiento, condiciones que se localizan dentro de las zonas boscosas más densas hacia el sureste de la península de Yucatán. Las variables con mayor relevancia para el futuro (2030), en los dos modelos evaluados, fueron vegetación, edafología y temperatura media del trimestre más frío, las cuales se mantuvieron

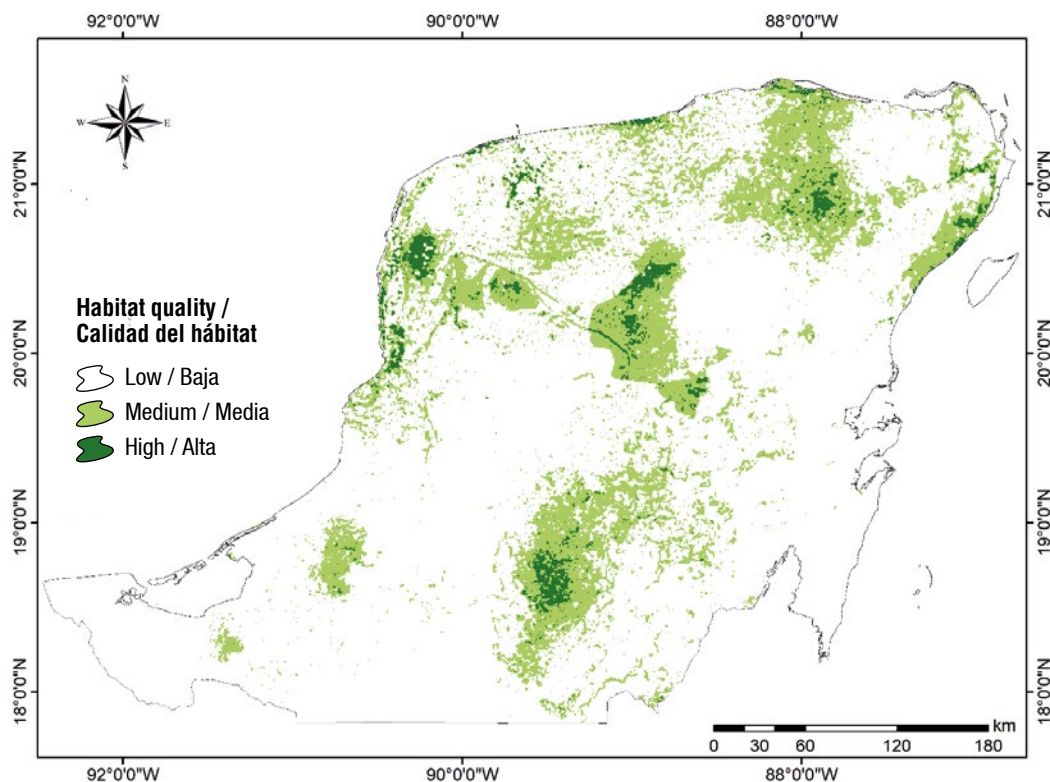


Figure 3. Classification of habitat quality areas of *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula.

Figura 3. Clasificación de las áreas de calidad de hábitat de *Cedrela odorata* en la península de Yucatán.

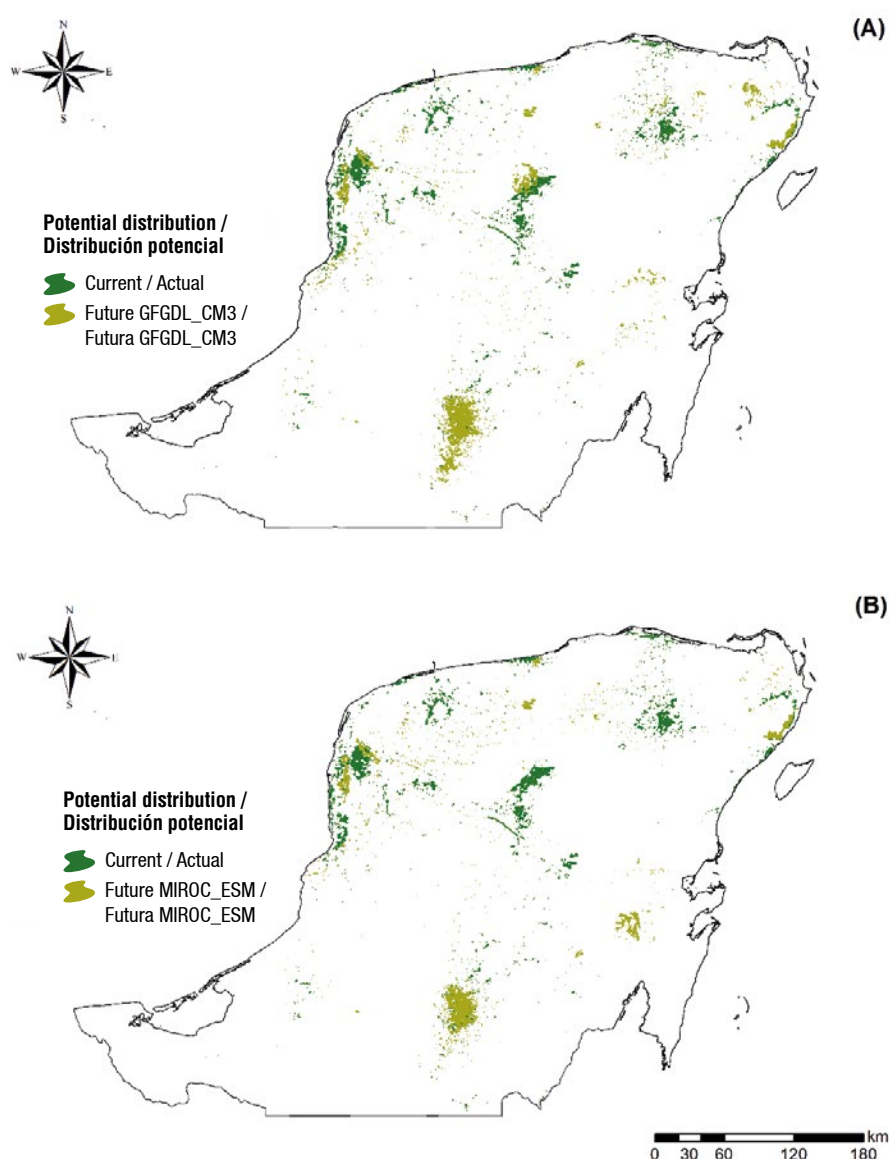


Figure 4. Potential current and future distribution by 2030 for *Cedrela odorata* in the Yucatan Peninsula.
Figura 4. Distribución potencial actual y futura al 2030 para *Cedrela odorata* en la península de Yucatán.

Although climate change scenarios predict a significant reduction in the species' ecological niche, they also indicate that natural populations of *C. odorata* would find a climatic refuge into the denser parts of the mid and upper forests, located in the southeast of Campeche State, specifically in the Calakmul Biosphere Reserve. The results on ecological niche decline are consistent with the projections of Estrada-Contreras, Equihua, Laborde, Meyer, and Sánchez-Velásquez (2016), who modeled the current and future distribution of *C. odorata* under climate change scenarios in Mexico, and reported a decline in its range of 3.8 % under the CGCM3 B1 scenario by 2030 from its current distribution. Garza-López et al. (2016) estimated a 60 % reduction in *S. macrophylla* climate habitat in the Yucatan Peninsula by 2030. The results of these authors and those obtained in the present study suggest a

como las principales variables determinantes en la distribución de la especie. Lo anterior indica que los cambios o alteraciones en la vegetación asociada con *C. odorata* tendrían gran impacto en las áreas de distribución a futuro de la especie.

Distribución potencial actual y futura

Los resultados indican una distribución potencial actual de *C. odorata* de 405 065 ha, equivalente a 2.9 % del área de estudio, donde dicha superficie reúne las condiciones ambientales más altas de calidad de hábitat, idóneas para la especie. La calidad de hábitat media representa una superficie de 19.2 % y la calidad de hábitat baja representa 77.9 %, la cual representa áreas marginales de casi nula idoneidad. Los resultados de esta clasificación permitieron generar un mapa de

medium-high vulnerability for the tropical species analyzed in southeastern Mexico. The combination of high temperatures and decreased precipitation would be the main cause for the reduction of suitable conditions for *C. odorata* in much of the peninsula; such a combination would make the species vulnerable to forest fires and attack by pests and diseases.

Villers-Ruiz et al. (2000) point out that the tropical forests of southeast Mexico could be converted into dry forests. In turn, Manzanilla-Quiñones and Aguirre-Calderón (2017) predict an increase in average annual temperature of 0.41 to 0.83 °C and a decrease in annual precipitation of between 35 and 71 mm in tropical areas of southeastern Mexico by 2030, so it is very likely that similar conditions will occur in the Yucatan Peninsula for the same year.

Due to global warming, modifications in the distribution of species are already taking place, with significant changes in the taxa that inhabit mountainous regions, where they tend to move altitudinally in order to subsist (Lenoir, Gegout, Marquet, de Ruffray, & Brisse, 2008; Manzanilla-Quiñones, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Treviño-Garza, & Yerena-Yamallel, 2019; Parolo & Rossi, 2008; Telwala, Brook, Manish, & Pandit, 2013). For this reason, it is a priority to carry out and analyze the simulations of climate change scenarios to determine which populations are at risk of disappearing due to the effects of climate change.

Conservation and seed production areas

Future models indicate that *C. odorata* will conserve a more suitable area of 88 603 to 64 342 ha, within the Calakmul, Los Petenes and Ría Celestún Biosphere Reserves (Figure 5). These reserves are located mainly in the municipalities of Hopelchén, Champotón and Calkiní in the state of Campeche, and in the municipality of Halachó in the state of Yucatán, where environmental conditions would serve as climatic refuges for the species in the near future (2030). Regarding the Calakmul Biosphere Reserve, results are similar to those reported by Garza-López et al. (2016, 2018) for *S. macrophylla* and *Lysiloma latisiliquum* L. Benth. These results may be useful in selecting areas for migration or assisted recolonization for conservation and restoration purposes for *C. odorata* in the Yucatan Peninsula, as suggested by Saenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval, and Beaulieu (2009) and the Secretariat of the Convention on Biological Diversity (CDB, 2009); furthermore, proper management of these areas will directly benefit the protection of the species.

The suitable areas for seed production were mainly located in the Calakmul and Los Petenes Biosphere Reserve, in the state of Campeche, with maximum

calidad de hábitat actual disponible para *C. odorata* en la península de Yucatán (Figura 3).

Por otra parte, los resultados de los modelos a futuro GFDL_CM3 y MIROC_ESM, proyectados a 2030, estiman un área potencial idónea de 277 037 y 226 138 ha, equivalentes a 1.6 y 2 % del área de estudio, respectivamente. Estos resultados representan una reducción importante entre 31 y 44.8 % del hábitat idóneo para la especie con respecto a su distribución potencial actual estimada (Figura 4).

Pese a que los escenarios de cambio climático predicen una reducción importante en el nicho ecológico de la especie, estos también indican que las poblaciones naturales de *C. odorata* encontrarían un refugio climático hacia las partes más densas de las selvas medias y altas, localizadas en el sureste del estado de Campeche, específicamente en la Reserva de la Biosfera de Calakmul. Los resultados sobre disminución de nicho ecológico concuerdan con las proyecciones de Estrada-Contreras, Equihua, Laborde, Meyer, y Sánchez-Velásquez (2016), quienes modelaron la distribución actual y futura de *C. odorata* bajo escenarios de cambio climático en México, y reportan una disminución en sus áreas de distribución de 3.8 % bajo el escenario CGCM3 B1 para el año 2030 con respecto a su distribución actual. Garza-López et al. (2016) estimaron 60 % de reducción en el hábitat climático de *S. macrophylla* en la península de Yucatán para 2030. Los resultados de estos autores y los obtenidos en el presente estudio sugieren una vulnerabilidad media-alta por parte de las especies tropicales analizadas en el sureste mexicano. La combinación de altas temperaturas y la disminución en la precipitación serían la causa principal en la reducción de las condiciones idóneas de *C. odorata* en gran parte de la península; dicha combinación haría a la especie vulnerable a los incendios forestales y al ataque de plagas y enfermedades.

Villers-Ruiz et al. (2000) señalan que los bosques tropicales del sureste de México se podrían convertir en bosques secos. A su vez, Manzanilla-Quiñones y Aguirre-Calderón (2017) predicen aumento en la temperatura promedio anual de 0.41 a 0.83 °C y disminución en la precipitación anual entre 35 a 71 mm en zonas tropicales del sureste mexicano para 2030, por lo que es muy probable que condiciones similares se presenten en la península de Yucatán para el mismo año.

Debido al calentamiento global, ya se están registrando modificaciones en la distribución de las especies, con cambios significativos en los taxones que habitan regiones montañosas, donde tienden a desplazarse altitudinalmente para poder subsistir (Lenoir, Gegout, Marquet, de Ruffray, & Brisse, 2008; Manzanilla-Quiñones, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Treviño-Garza, & Yerena-Yamallel, 2019; Parolo & Rossi, 2008;

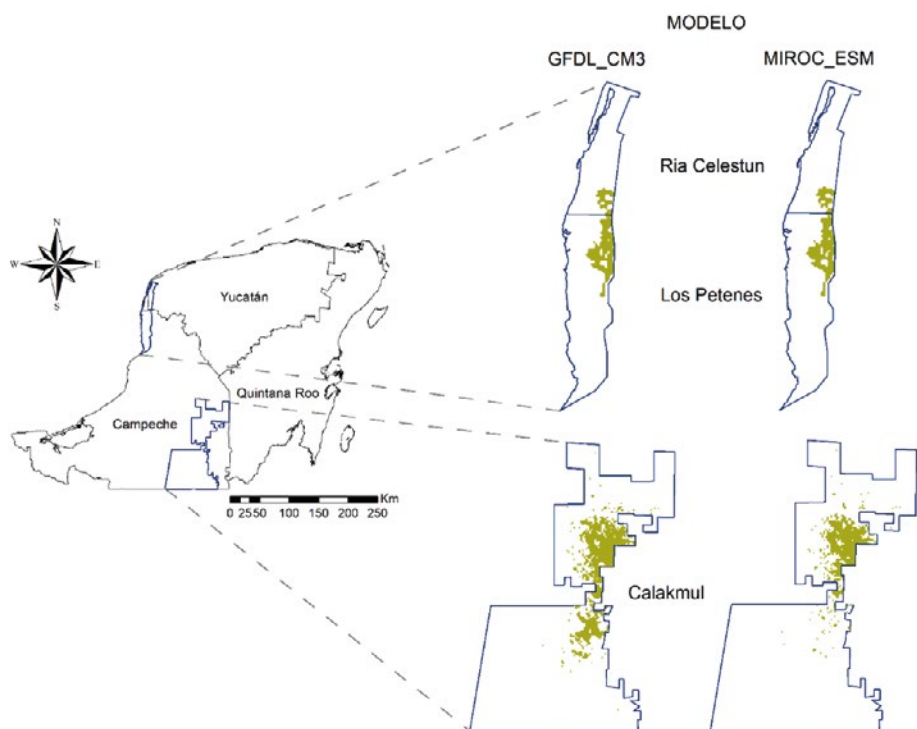


Figure 5. Conservation areas of *Cedrela odorata* by 2030 within the polygon of natural protected areas in the Yucatan peninsula.

Figura 5. Áreas de conservación de *Cedrela odorata* para el 2030 dentro de la poligonal de las áreas naturales protegidas en la península de Yucatán.

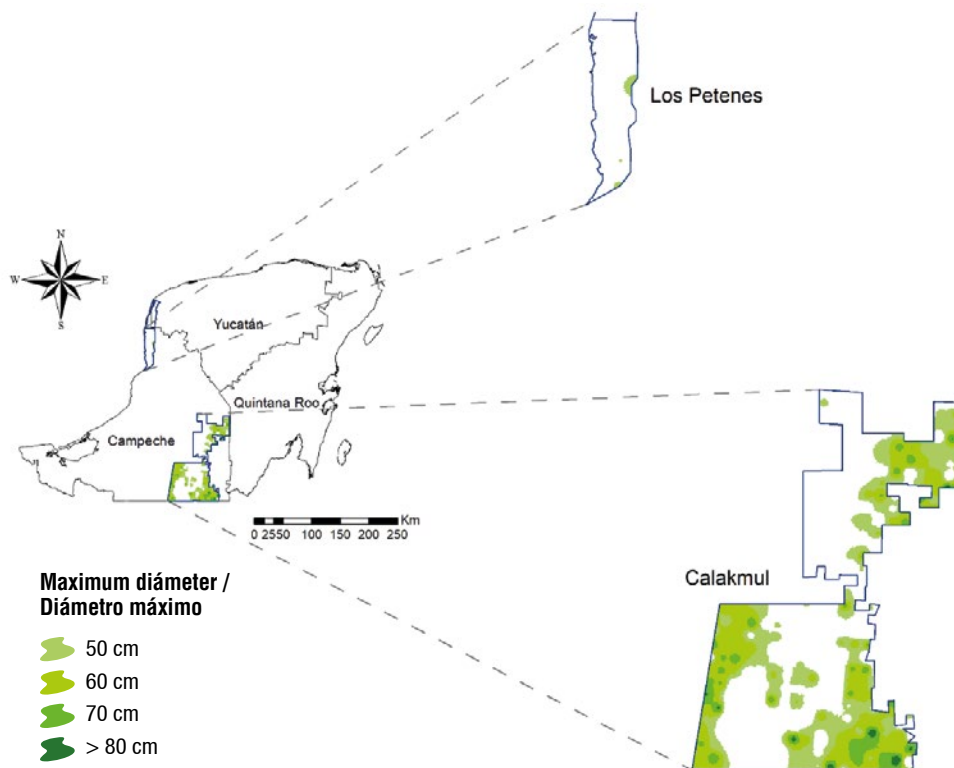


Figure 6. Areas suitable for the production of *Cedrela odorata* seeds, according to their maximum diameter, in the Calakmul Biosphere Reserve and the Petenes in the Yucatan peninsula.

Figura 6. Áreas aptas para la producción de semillas de *Cedrela odorata*, en función de su diámetro máximo, en la Reserva de la Biósfera Calakmul y los Petenes en la península de Yucatán.

diameters between 50 and 80 cm and heights of 10 to 30 m within an area of 341 481 ha (Figure 6). In these areas there are red cedar trees with morphological and phenotypical conditions suitable for seed production and collection and with which it is feasible to establish *in situ* conservation and restoration activities. Navarro-Cerrillo, Clavero, Vidaña, Quero, and Duque-Lazo (2016) mention that defining germplasm-producing areas would help conservation and safeguard the genetic material of the species of interest.

Conclusions

The ecological niche models provided valuable information on the areas with the highest habitat quality suitability of *Cedrela odorata* in the current and future (2030) distribution in the Yucatan peninsula. The models helped to define areas of distribution with phenotypically desirable specimens for seed production and suitable for the conservation of the species in the natural protected areas of Calakmul, Los Petenes and Ría Celestún. The most relevant variable was vegetation, which means that the slightest change in this variable would severely affect the distribution of the species in the future. Niche models of *C. odorata* can be used to support restoration and conservation programs for the species, as well as to propose management strategies for the establishment of seed-producing zones and *in situ* protection of the species' genetic pool. This type of study is extremely relevant in the conservation of species in the face of climate change in Mexico.

Acknowledgements

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the support of a postgraduate scholarship (No. 469568) to the first author. To the Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICyT CT705-19) of the Universidad Autónoma de Nuevo León for the support in the dissemination of research results.

End of English version

References / Referencias

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J. A., Benito-de Pando, B., Linares, J. C., Nieto-Lugilde, D., & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: A phytogeographic approach using pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x
- Andrade, T. A., & Solís, R. L. Y. (2004). Las bondades del cedro rojo. *La Ciencia y el Hombre*, 17(3). Retrieved from <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol17num3/articulos/cedro/index.htm>

Telwala, Brook, Manish, & Pandit, 2013). Por tal razón, es prioridad realizar y analizar las simulaciones de los escenarios de cambio climático para determinar cuáles poblaciones están en riesgo de desaparecer por los efectos del cambio climático.

Áreas de conservación y de producción de semillas

Los modelos a futuro señalan que *C. odorata* conservará un área con mayor idoneidad de 88 603 a 64 342 ha, dentro de las reservas de la Biosfera Calakmul, Los Petenes y Ría Celestún (Figura 5). Estas reservas se sitúan principalmente en los municipios de Hopelchén, Champotón y Calkiní del estado de Campeche, y en el municipio de Halachó estado de Yucatán, donde las condiciones ambientales funcionarían como refugios climáticos para la especie a futuro cercano (2030). Con respecto a la Reserva de la Biosfera Calakmul, los resultados son similares a lo reportado por Garza-López et al. (2016, 2018) para *S. macrophylla* y *Lysiloma latisiliquum* L. Benth. Estos resultados pueden ser útiles en la selección de áreas para la migración o recolonización asistida con fines de conservación y restauración de *C. odorata* en la península de Yucatán, como sugieren Sáenz-Romero, Rehfeldt, Crookston, Duval, y Beaulieu (2009) y la Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB, 2009); además, el manejo adecuado de estas áreas beneficiará directamente a la protección de la especie.

Las áreas idóneas para la producción de semillas se localizaron principalmente en la Reserva de la Biosfera de Calakmul y Los Petenes, en el estado de Campeche, con diámetros máximos entre 50 a 80 cm y alturas de 10 a 30 m dentro de una superficie de 341 481 ha (Figura 6). En estas áreas hay árboles de cedro rojo con condiciones morfológicas y fenotípicas aptas para la producción y recolección de semillas y con los cuales es factible establecer actividades de conservación y restauración *in situ*. Navarro-Cerrillo, Clavero, Vidaña, Quero, y Duque-Lazo (2016) mencionan que definir áreas productoras de germoplasma ayudarían a la conservación y salvaguardarían el material genético de la especie de interés.

Conclusiones

Los modelos de nicho ecológico aportaron información valiosa sobre las áreas con mayor idoneidad de calidad de hábitat de *Cedrela odorata* en la distribución actual y futura (2030) en la península de Yucatán. Los modelos ayudaron a definir áreas de distribución con ejemplares fenotípicamente deseables para la producción de semillas e idóneas para la conservación de la especie en las áreas naturales protegidas de Calakmul, Los Petenes y Ría Celestún. La variable más relevante fue la vegetación, lo que significa que el menor cambio en dicha variable afectaría severamente la distribución de

- Araújo, M. B., & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modeling. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1677–1688. doi: 10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x
- Burgmer, T., Hillerbrand, H., & Pfenninger, M. (2007). Effects of climate-driven temperature changes on the diversity of freshwater macroinvertebrates. *Oecologia*, 151, 93–103. doi: 10.1007/s00442-006-0542-9
- Castellanos-Acuña, D., Vance-Borland, K. W., Bradley St. Clair, J., Hamann, A., López-Upton, J., Gómez-Pineda, E., Ortega-Rodríguez, J. M., & Sáenz-Romero, C. (2018). Climate-based seed zones for México: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New Forests*, 49(3), 297–309. doi: 10.1007/s11056-017-9620-6
- Coitiño, H. I., Montenegro, F., Fallabrino, A., González, E. M., & Hernández, D. (2013). Distribución actual y potencial de *Cabassous tatouay* y *Tamandua tetradactyla* en el límite sur de su distribución: implicancias para su conservación en Uruguay. *Edentata*, 14(1), 23–34. doi: 10.5537/020.014.0104
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2009). Inventario Nacional Forestal y de Suelo 2004-2009. Retrieved from <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1995). Edafología. Escalas 1:250,000 y 1:1,000,000. Archivo vectorial shapefile. Retrieved March 2017 from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml>
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). (2011). Appendices I, II y III. Retrieved from <https://cites.org/sites/default/files/eng/app/2019/E-Appendices-2019-11-26.pdf>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427–2437. doi: 10.1002/joc.3848
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologist. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. doi: 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x
- Environmental Scientific Research Institute (ESRI). (2014). ArcGIS desktop, version 10.3. Redlands, California, Virginia, USA: Author.
- Estrada-Contreras, I., Equihua, M., Laborde, J., Meyer, E. M., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Current and future distribution of the tropical tree *Cedrela odorata* L. in México under climate change scenarios using MaxLike. *PloS ONE*, 11(10), e0164178. doi: 10.1371/journal.pone.0164178
- Franklin, J. (2010). *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. UK: Cambridge University Press.
- García, E. (1998). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Archivo vectorial shapefile. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- la especie a futuro. Los modelos de nicho de *C. odorata* pueden servir de apoyo a los programas de restauración y conservación de la especie, así como para proponer estrategias de manejo para el establecimiento de zonas productoras de semillas y de protección *in situ* del acervo genético de la especie. Este tipo de estudios son sumamente relevantes en la conservación de especies ante el cambio climático en México.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca de posgrado (núm. 469568) al primer autor. Al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICyT CT705-19) de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo en la divulgación de los resultados de la investigación.

Fin de la versión en inglés

- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J. M., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Toledo, J. F., Domínguez-Álvarez, F. A., & Sáenz-Romero, C. (2016). Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences*, 94(1), 43–50. doi: 10.17129/botsci.500
- Garza-López, M., Ortega-Rodríguez, J. M., Zamudio-Sánchez, F. J., López-Toledo, J. F., Domínguez-Álvarez, F. A., & Sáenz-Romero, C. (2018). Modificación del hábitat para *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. (Tzalam) por el cambio climático. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(2), 127–135. Retrieved from <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/41-2/4a.pdf>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2017). Bases de datos geográficos disponibles para *Cedrela odorata* L. en México. Retrieved January 12, 2017 from <https://www.gbif.org/occurrence/search?q=Cedrela%20odorata>
- Gómez, D. J. D., Monterroso, R. A. I., & Tinoco, R. J. Á. (2007). Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 13(2), 29–49. doi: 10.21829/myb.2007.1321227
- Huang, S., Titus, S. J., & Wiens, D. P. (1992). Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(9), 1297–1304. doi: 10.1139/x92-172
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Características edafológicas, fisiográficas e hidrológicas de México*. México: Author.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales de Uso de suelo y vegetación, serie VI, escala: 1: 250,000. Retrieved March 14, 2017 from <http://www.conabio.gob>

- mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320(5884), 1768–1771. doi: 10.1126/science.1156831
- Manzanilla, Q. U., Delgado, V. P., Hernández, R. J., Molina, S. A., García, M. J. J., & Rocha, G. 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 de conservación. *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1398. doi: 10.21829/abm126.2019.1398
- Manzanilla-Quijones, U., & Aguirre-Calderón, O. A. (2017). Zonificación climática actual y escenarios de cambio climático para la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote en Chiapas, México. In L. Ruíz-Montoya, G. Álvarez-Gordillo, N. Ramírez-Marcial, & B. Cruz-Salazar (Eds.), *Vulnerabilidad social y biológica ante el cambio climático en la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote* (pp. 25–66). San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México: ECOSUR.
- Manzanilla-Quijones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yeren-Yamallel, J. I. (2019). Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Eje Neovolcánico Transversal. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521804. doi: 10.21829/myb.2019.2521804
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5–24. doi: 10.17129/botsci.508
- Mendizábal-Hernández, L. C., Alba-Landa, J., & Suárez-Dorantes, T. (2009). Captura de carbono por *Cedrela odorata* L. en una plantación de origen genético conocido. *Foresta Veracruzana*, 11(1), 13–18. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/497/49711999003.pdf>
- Miranda, S. C. A., Geada, L. G., & Sotolongo, S. R. (2016). Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Avances*, 18(1), 28–35. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5381452>
- Monterrubio-Rico, T. C., Charre-Medellín, J. F., Pacheco-Figueroa, C., Arriaga-Weiss, S., Valdez-Leal, J. D., Cancino-Murillo, R., & Rubio-Rocha, Y. (2016). Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 1103–1117. doi: 10.1016/j.rmb.2016.06.004
- Morales, N. (2012). Modelos de distribución de especies: software MaxEnt y sus aplicaciones en conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2(1), 1–5.
- Morrone, J. J., & Escalante, T. (2016). *Introducción a la biogeografía* (1.ª ed.). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Narayani, B. (2008). Tool for Partial ROC version 1.0. Lawrence, KS, USA: University of Kansas-CONABIO. Retrieved from <http://nicho.conabio.gob.mx/home/proposito-y-guia-del-usuario/validacion-del-modelo>
- Navarro-Cerrillo, R. M., Clavero, I., Vidaña, A. L., Quero, J. L., & Duque-Lazo, J. (2016). Integración de datos de inventario y modelos de hábitat para predecir la regeneración de especies leñosas mediterráneas en repoblaciones forestales. *Ecosistemas*, 25(3), 6–21. doi: 10.7818/ECOS.2016.25-3.02
- Osorio-Olvera, L., Vijay, B., Narayani, B., Soberón, J., & Falconi, M. (2016). Ntbox: From getting biodiversity data to evaluating species distributions models in a friendly GUI environment. R package version 0.2.5.4. Retrieved March 17, 2017, from <https://github.com/luismurao/ntbox>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: Author. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Parolo, G., & Rossi, G. (2008). Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in the Alps. *Basic and Applied Ecology*, 9(2), 100–107. doi: 10.1016/j.baae.2007.01.005
- Pennington, T. D. & Sarukhán J., (2005). Árboles tropicales de México: *Manual para la identificación de las principales especies* (3.ª ed.). México: UNAM-Fondo de Cultura Económica.
- Perosa, M., Rojas, F., Villagra, P., Tognelli, M. F., Carrana, R., & Álvarez, J. A. (2014). Distribución potencial de los bosques de *Prosopis flexuosa* en la Provincia Biogeográfica del Monte (Argentina). *Ecología Austral*, 24(2), 238–248. Retrieved from http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/2731
- Peterson, A. T. (2011). Paleoclimates: Understanding climate change past and present. *Quarterly Review of Biology*, 86(4), 342–343. doi: 10.1086/662496
- 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
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schaphire, 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
- Rodríguez, R., Daquinta, M., Capote, I., Pina, D., Lezcano, Y., & González-Olmedo, J. L. (2003). Nuevos aportes a la micropropagación de *Swietenia macrophylla* x *Swietenia mahogany* (caoba híbrida) y *Cedrela odorata* (cedro). *Cultivos Tropicales*, 24(3), 23–27. Retrieved from <http://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/viewFile/572/pdf>

- Romo-Lozano, J. L., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Ávila-Ángulo, M. L. (2017). Estimación del valor financiero de las existencias maderables de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México. *Madera y Bosques*, 23(1), 111–120. doi: 10.21829/myb.2017.231473
- Ruiz-Jiménez, C. A., De los Santos-Posadas, H. M., Parraguirre-Lezama, J. F., & Saavedra-Millán, F. D. (2018). Evaluación de la categoría de riesgo de extinción del cedro rojo (*Cedrela odorata*) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 938–949. doi: 10.22201/ib.20078706e.2018.3.2192
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., & Beaulieu, J. (2009). *Estimaciones de cambio climático para Michoacán: Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservación de la Mariposa Monarca*. México: Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán. Retrieved from https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2009_saenz_romero_c001.pdf
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, G. E., Pierre, N. L., St-Amant, D., Beaulieu, J., & Richardson, B. (2010). Contemporary and projected spline climate surfaces for México and their use in understanding climate-plant relationships. *Climatic Change*, 102, 595–623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Ortega-Rodríguez, J. M., Marín-Togo, M. C., & Madrigal-Sánchez, X. (2015). *Pinus leiophylla* suitable habitat for 1961-1990 and future climate. *Botanical Sciences*, 93(4), 709–718. doi: 10.17129/botsci.86
- Salazar, R., Soihet, C., & Méndez, J. M. (2000). *Manejo de semillas de 100 especies forestales de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). (2009). Relación entre la diversidad biológica y la mitigación y adaptación al cambio climático. Informe del Segundo grupo especial de expertos técnicos sobre diversidad biológica y cambio climático. Montreal, Canadá: Author. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/publications/ahteg-brochure-es.pdf>
- Secretaría de 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. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Anuario estadístico de la producción forestal 2016*. México: Author. Retrieved from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282951/2016.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2017). Áreas naturales protegidas federales de México. Archivo vectorial shapefile. Retrieved May 21, 2019, from <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>
- Shcheglovitova, M., & Anderson, R. P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small simple sizes. *Ecological Modelling*, 269, 9–17. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distribution areas. *Biodiversity Information*, 2, 1–10. doi: 10.17161/bi.v2i0.4
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437–441. doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.011
- Telwala, Y., Brook, B. W., Manish, K., & Pandit, M. K. (2013). Climate-induced elevational range shifts and increase in plant species richness in a Himalayan biodiversity epicentre. *PLoS ONE* 8(2), e57103. doi: 10.1371/journal.pone.0057103
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (2000). El cambio climático y la vegetación en México. In C. Gay G. (Ed.), *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (57–66). México: Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. Retrieved from <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Villers-y-Trejo-.pdf>
- Yuancai, L., & Parresol, B. R. (2001). *Remarks on height-diameter modeling* (vol. 10). USA: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.