

Mexican plums (*Spondias spp.*): their current distribution and potential distribution under climate change scenarios for Mexico

Ciruelas mexicanas (*Spondias spp.*): su aptitud actual y potencial con escenarios de cambio climático para México

Antonio Rafael Arce-Romero¹; Alejandro Ismael Monterroso-Rivas^{1*}; Jesús David Gómez-Díaz¹; Artemio Cruz-León²

Universidad Autónoma Chapingo, ¹Departamento de Suelos y ²Centros Regionales Universitarios. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO. aimrivas@correo.chapingo.mx, tel.: 595 952 15 00, ext. 6178 (*Corresponding author)

Abstract

Plums (*Spondias spp.*) are species native to Mexico with adaptive, nutritional and ethnobotanical advantages. The aim of this study was to assess the current and potential distribution of two species of Mexican plum: *Spondias purpurea* L. and *Spondias mombin* L. The method applied was ecological niche modeling in Maxent software, which has been used in Mexico with good results. In fieldwork, information on the presence of these species in the country was collected. In addition, environmental variables of biogeographic importance, all with nationwide coverage, were generated. The climate change scenario applied was for the horizon 2075-2099, considering the GFDL_CM3, HADGEM2_ES, and Ensemble REA models, all under RCP 8.5 W·m⁻² scenarios. Distribution models were validated by four concordance indices. The most important environmental factors for modeling *Spondias spp.* were thermal oscillation, low temperatures and precipitation in some months of the year. In the reference scenario, suitability for plums was found in 3.8 and 6.6 % of the country for *S. purpurea* and *S. mombin*, respectively. With climate change scenarios at the national level, *S. mombin* recorded a 13.3 % decrease in suitability growing areas, while *S. purpurea* recorded a 5.7 % drop.

Keywords: *Spondias mombin*, *Spondias purpurea*, ecological niche, potential distribution.

Resumen

Las ciruelas (*Spondias spp.*) son especies nativas de México con ventajas adaptativas, nutrimentales y etnobotánicas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la distribución actual y potencial de dos especies de ciruela mexicana: *Spondias purpurea* L. y *Spondias mombin* L. El método aplicado fue el modelado de nicho ecológico en el software Maxent, mismo que ha sido usado en México con buenos resultados. En trabajo de campo se recopiló información sobre la presencia de dichas especies en el país. Asimismo, se generaron variables ambientales de importancia biogeográfica, todas con cobertura nacional. Los escenarios de cambio climático aplicados fueron al horizonte lejano (2075-2099) considerando los modelos GFDL_CM3, HADGEM2_ES, Ensemble REA y todos bajo escenarios RCP 8.5 W·m⁻². Los modelos de distribución se validaron mediante cuatro índices de concordancia. Los factores ambientales más importantes para el modelado de *Spondias spp.* fueron oscilación térmica, bajas temperaturas y precipitación en algunos meses del año. En el escenario base se encontró aptitud para las ciruelas en 3.8 y 6.6 % del territorio nacional para *S. purpurea* y *S. mombin*, respectivamente. Con escenarios de cambio climático a nivel nacional, *S. mombin* registró 13.3 % de disminución en las zonas aptas; mientras que *S. purpurea* reportó 5.7 % menos superficie apta para crecer.

Palabras clave: *Spondias mombin*, *Spondias purpurea*, nicho ecológico, distribución potencial.



Introduction

Plums (*Spondias spp.*) are species native to Mexico that should be used and preserved. Their fruit has been barely studied but their adaptive, nutritional and ethnobotanical advantages, strongly associated with agroforestry practices, are recognized (Cuevas-Sánchez, 1992). Today, *Spondias purpurea* and *Spondias mombin* are recognized as the most important species of Mexican plums; however, both are underused and knowledge of their benefits is limited to the local level (Avitia-García, González-Castillo, & Pimienta-Barrios, 2000).

S. purpurea has been characterized as part of the secondary vegetation of medium- height sub-deciduous and deciduous forests associated with a warm dry climate with an average annual temperature range of 20 to 29 °C and annual rainfall of 500 to 1,600 mm, with a dry season of five to eight months (Avitia-García et al., 2000). Several authors have reported it as being susceptible to frost (Cruz-León, Pita-Duque, & Rodríguez-Haros, 2010), although others have highlighted its ability to grow in shallow soils with poor drainage (Cuevas-Sánchez, 1992).

S. mombin is associated with secondary vegetation of tall and medium-height evergreen forests, with mean annual temperatures of 16-34 °C and rainfall of 800 to 3,000 mm (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2012; von Carlowitz, Wolf, & Kemperman, 1991). It is distributed in a warm wet climate at elevations of up to 1,200 meters (Pennington & Sarukhan, 1998). Although different botanical characterizations have been reported, a detailed potential distribution of Mexican plum species has not yet been generated. Having information on the factors affecting the presence of the genus and identifying potential areas for its establishment are fundamental steps for its conservation, rescue and promotion.

Climate is known to be one of the main factors that influences the distribution of species, so variation in it over time could lead to the loss of the existing balance in ecosystems (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013). In recent years, changes in the atmosphere's global systems have been documented, and although they have occurred throughout Earth's history, humans have played a key role in the emission of greenhouse gases (IPCC, 2001). It has been established that one of the main threats to the future distribution of species is climate change, which can reduce current natural distribution areas due to rapid environmental changes that do not allow species to adapt to new climate conditions with the speed demanded (Cianfrani, Satizábal, & Randin, 2015; Trejo et al., 2011; Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2003).

Different general circulation models (GCM) of the atmosphere, which are used to project future climate

Introducción

Las ciruelas (*Spondias spp.*) son especies nativas de México que deben ser aprovechadas y conservadas. Su fruto ha sido poco estudiado pero se reconocen sus ventajas adaptativas, nutrimentales y etnobotánicas, fuertemente asociadas a prácticas agroforestales (Cuevas-Sánchez, 1992). Actualmente se reconoce a *Spondias purpurea* y *Spondias mombin* como las especies más importantes de las ciruelas mexicanas; no obstante que ambas se encuentran subutilizadas y el conocimiento de sus beneficios es local (Avitia-García, González-Castillo, & Pimienta-Barrios, 2000).

Se ha caracterizado a *S. purpurea* como parte de la vegetación secundaria de selvas medianas subcaducifolias y caducifolias asociadas con clima cálido seco con intervalo de temperaturas promedio anuales de 20 a 29 °C y precipitación anual de 500 a 1,600 mm, presentando una temporada seca de cinco a ocho meses (Avitia-García et al., 2000). Diversos autores la han reportado como susceptible a heladas (Cruz-León, Pita-Duque, & Rodríguez-Haros, 2010), aunque otros han destacado su capacidad para desarrollarse en suelos someros y de difícil drenaje (Cuevas-Sánchez, 1992).

Por su parte, *S. mombin* se asocia con vegetación secundaria de selvas altas y selvas medianas perennifolias, con temperaturas medias anuales de 16 a 34 °C y precipitación de 800 a 3,000 mm (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2012; von Carlowitz, Wolf, & Kemperman, 1991). Presenta distribución en clima cálido húmedo en altitudes de hasta 1,200 msnm (Pennington & Sarukhán, 1998). Aunque se encontraron distintas caracterizaciones botánicas, aún no se ha generado una distribución potencial detallada de las especies de ciruela mexicana. Contar con información de los factores que inciden en la presencia del género e identificar posibles áreas para su establecimiento constituyen pasos fundamentales para su conservación, rescate y promoción.

Se sabe que el clima es uno de los principales factores que influyen en la distribución de las especies por lo que su variación en el tiempo podría conllevar a la pérdida del equilibrio existente en los ecosistemas (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013). En los últimos años se han documentado los cambios en los sistemas globales de la atmósfera y, si bien han ocurrido durante toda la historia de la Tierra, el ser humano ha jugado un papel fundamental en la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2001). Se ha establecido que una de las principales amenazas para la distribución futura de las especies es el cambio climático; esto puede impactar en la disminución de las superficies de distribución natural actual, debido a los cambios ambientales vertiginosos que no permiten a las especies adaptarse a nuevas condiciones climáticas con la velocidad demandada (Cianfrani,

conditions considering the anthropogenic impact of greenhouse gas emissions and their dynamics in the atmosphere, have been developed (Cavazos et al., 2013). Studies on various tree species considering GCMs have found a decrease in potential distribution as a result of increased temperature and decreased precipitation (Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas, & Tinoco-Rueda, 2007). In light of the above, the Mexican plum is expected to change its spatial distribution patterns due to climate change.

Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of climate change on the current and potential distribution of two species of plum (*Spondias purpurea* and *Spondias mombin*) in Mexico, considering changes in precipitation and temperature. The ecological niche concept was used in current and climate change scenarios to know the possible changes in distribution areas of these species.

Materials and methods

Current presence of species

A total of 542 georeferenced presence points were obtained for *S. purpurea* and *S. mombin* from three main sources: National Forest and Soil Inventory (CONAFOR, 2009) with 23 % of the collected points, national and international herbarium collections reported by Cruz-León et al. (2010) with 42 % and an international biodiversity information server which contributed 35 % (Global Biodiversity Information Facility [GBIF], 2015). Data were homogenized by eliminating points found outside the national territory, which did not contain collection information or that would have been reported before 1980, in order to avoid possible georeferencing or identification errors. Those points located in urban use sites were also eliminated as the aim was to model the natural distribution potential of the species (Soberón & Nakamura, 2009). As a result of the debugging, 316 points for *S. mombin* and 189 for *S. purpurea* were used. It was observed that Yucatán, Chiapas and Campeche accounted for 44 % of the references used in the modeling.

Biogeographic variables

Through a literature review, the environmental variables reported to have the most influence on plum distribution were selected. Twenty-two predictor variables were considered (Table 1): 16 bioclimatic, two edaphic, one latitudinal, one geological and two topographic. Edaphic, geological and topographic information was obtained from official information sources in Mexico (*Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática* [INEGI], 2005, 2013a, 2013b). On the other hand, detailed mapping of the bioclimatic variables was generated using the methodology described by O'Donnell and Ignizio

Satizábal, & Randin, 2015; Trejo et al., 2011; Villers-Ruiz & Trejo-Vázquez, 2003).

Se han generado diferentes modelos de circulación general de la atmósfera (GCM, por sus siglas en inglés), que se abocan a proyectar condiciones climáticas futuras considerando el impacto antropogénico de las emisiones de gases de efecto invernadero y su dinámica en la atmósfera (Cavazos et al., 2013). Estudios realizados en diversas especies arbóreas considerando los GCM, han arrojado disminución en la distribución potencial como resultado del incremento en la temperatura y la disminución de la precipitación (Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas, & Tinoco-Rueda, 2007). Por lo anterior, se espera que la ciruela mexicana sea susceptible a modificar los patrones de su distribución espacial como consecuencia del cambio climático.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del cambio climático sobre la distribución actual y potencial de dos especies de ciruela (*Spondias purpurea* y *Spondias mombin*) en México, considerando la alteración de la precipitación y la temperatura. Se usó el concepto de nicho ecológico en escenarios actuales y de cambio climático para conocer las posibles modificaciones en la superficie de distribución de dichas especies.

Materiales y métodos

Presencia actual de las especies

Se obtuvieron 542 puntos georreferenciados de presencia para *S. purpurea* y *S. mombin* a partir de tres principales fuentes: Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2009) con 23 % de los puntos colectados, colectas en herbarios nacionales e internacionales reportados por Cruz-León et al. (2010) con 42 % y un servidor internacional de información de biodiversidad que aportó 35 % (*Global Biodiversity Information Facility* [GBIF], 2015). Los datos se homogeneizaron mediante la eliminación de los puntos que se encontraron fuera de la superficie nacional, que no contuvieran información de colecta o que hubieran sido reportados antes de 1980; esto con el fin de evitar posibles errores de georreferencia o de identificación. También se eliminaron aquellos puntos ubicados en sitios de uso urbano; buscando así modelar la distribución potencial natural de las especies (Soberón & Nakamura, 2009). Resultado de la depuración se utilizaron 316 puntos para *S. mombin* y 189 para *S. purpurea*. Se observó que Yucatán, Chiapas y Campeche concentraron 44 % de las referencias utilizadas en el modelado.

Variables biogeográficas

Mediante revisión bibliográfica se eligieron las variables ambientales reportadas con mayor influencia

(2012). These variables have the advantage of being biologically significant by combining temperature and precipitation throughout the year, allowing analysis of seasonal patterns (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

To obtain the bioclimatic variables of the reference scenario, the information of Gómez et al. (2008), which is based on the concept of areas of climatic influence, defined as homogeneous in annual precipitation and temperature, was used. Climate change models were obtained and processed from the UNIATMOS platform (Fernández, Zavala, & Romero, 2009). Bioclimatic variables with climate change scenarios were processed with the same methodology of O'Donnell and Ignizio (2012). The HADGEM2_ES (English), GFDL_CM3 (American) and Ensemble REA models were considered. These models were selected due to their good ability to reproduce the observed climate, and the fact they have been widely used in Mexico (Conde, Estrada, & Martínez, 2011). It has been reported that on average for Mexico the HADGEM model projects increased temperature and decreased precipitation, while the GFDL forecasts a general increase in both variables (Gómez-Díaz et al., 2007).

Within the climate scenario groups, representative concentration pathway (RCP) 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ was used. An RCP measures the amount of energy added to the atmospheric system and that generates effective heating (van Vuuren et al., 2011). The potential distribution of plum was projected to the horizon 2075-2099 to know the possible long-term impacts. The combination of the models and radiative forcing resulted in three climate change scenarios for both species of plum: 1) HADGEM RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 2) GFDL RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ and 3) REA RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Each represents an alternative of how the climate could change in the future (Conde et al., 2011).

Ecological niche modeling

Potential distribution was estimated using the maximum entropy algorithm of Maxent software, which has been widely used in Mexico with good results for modeling the distribution of flora and fauna (Miller & Knouft, 2006; Trejo et al., 2011). Entropy, in this context, is defined as the measure of the amount of information considered in the selection of an event (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006). The Maxent algorithm analyzes the conditions where the species has been reported by contrasting the georeferenced presence points with environmental variables. With this, a set of conditions under which the species can live ideally, what is known as an ecological niche, is defined (Soberón & Nakamura, 2009). By regression functions, the software estimates the probability of species presence at a site, which can be geographically translated into a potential distribution (Elith et al., 2011).

en la distribución de la ciruela. Se consideraron 22 variables predictoras (Cuadro 1): dieciséis bioclimáticas, dos edáficas, una latitudinal, una geológica y dos topográficas. La información edáfica, geológica y topográfica se obtuvo de fuentes oficiales de información en México (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2005, 2013a, 2013b). Por otro lado, se generó cartografía detallada de las variables bioclimáticas mediante la metodología de variables bioclimáticas descrita por O'Donnell e Ignizio (2012). Estas variables presentan la ventaja de ser biológicamente significativas al combinar temperatura y precipitación a lo largo del año, permitiendo analizar comportamientos estacionales (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005).

Para obtener las variables bioclimáticas del escenario base se utilizó la información de Gómez et al. (2008), que se fundamenta en el concepto de áreas de influencia climática, definidas como homogéneas en precipitación y temperatura anual. Los modelos de cambio climático fueron obtenidos y procesados a partir de la plataforma UNIATMOS (Fernández, Zavala, & Romero, 2009). Las variables bioclimáticas con escenarios de cambio climático se procesaron con la misma metodología de O'Donnell e Ignizio (2012). Se consideraron los modelos HADGEM2_ES (inglés), GFDL_CM3 (estadounidense) y el Ensemble REA. La selección de los modelos se basó en su buen desempeño para reproducir el clima observado, además de que han sido ampliamente utilizados en México (Conde, Estrada, & Martínez, 2011). Se ha reportado que en promedio para México el modelo HADGEM proyecta aumento de la temperatura y disminución de la precipitación; mientras que el GFDL prevé un incremento generalizado de ambas variables (Gómez-Díaz et al., 2007).

Dentro de los grupos de escenarios climáticos se consideró la concentración de forzamiento radiativo (RCP, por sus siglas en inglés) a 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; la cual se define como la medida de la cantidad de energía que es adicionada al sistema atmosférico y genera calentamiento efectivo (van Vuuren et al., 2011). Se proyectó la distribución potencial de la ciruela al horizonte lejano (2075-2099) para conocer los posibles impactos a largo plazo. La combinación de los modelos y el forzamiento radiativo resultó en tres escenarios de cambio climático para ambas especies de ciruela: 1) HADGEM RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 2) GFDL RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y 3) REA RCP 8.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Cada uno representa una alternativa de cómo el clima podría cambiar en el futuro (Conde et al., 2011).

Modelado del nicho ecológico

La distribución potencial se estimó mediante el algoritmo de máxima entropía del *software* Maxent; el cual ha sido ampliamente utilizado en México con

Table 1. Mapped bioclimatic variables.**Cuadro 1. Variables bioclimáticas cartografiadas.**

Variable	Category* / Categoría*
Tropics - Latitude / Trópicos- Latitud	Latitudinal
Annual ETP / ETP anual	Climatic / Climática
January wind speed / Velocidad del viento enero	Climatic / Climática
September precipitation / Precipitación septiembre	Climatic / Climática
April precipitation / Precipitación abril	Climatic / Climática
January mean temperature / Temperatura media de enero	Climatic / Climática
Isothermality / Isotermalidad	Bioclimatic / Bioclimática
Temperature seasonality / Estacionalidad térmica	Bioclimatic / Bioclimática
Min temperature of coldest period / Temperatura mínima del periodo más frío	Bioclimatic / Bioclimática
Temperature annual range / Oscilación térmica anual	Bioclimatic / Bioclimática
Mean Temperature of coldest quarter / Temperatura media del trimestre más frío	Bioclimatic / Bioclimática
Annual precipitation / Precipitación anual	Bioclimatic / Bioclimática
Precipitation of wettest month / Precipitación del mes más húmedo	Bioclimatic / Bioclimática
Precipitation of driest month / Precipitación del mes más seco	Bioclimatic / Bioclimática
Precipitation seasonality / Estacionalidad de la precipitación	Bioclimatic / Bioclimática
Precipitation of driest quarter / Precipitación del trimestre más seco	Bioclimatic / Bioclimática
Precipitation of warmest quarter / Precipitación del trimestre más cálido	Bioclimatic / Bioclimática
Dominant soil group / Tipo de suelo dominante	Edaphic / Edáfica
Soil physical phase / Fase física del suelo	Edaphic / Edáfica
Dominant rock group / Tipo de roca dominante	Geological / Geológica
Elevation / Altitud	Topographical / Topográfica
Slope orientation / Orientación de la pendiente	Topographical / Topográfica

*Category assigned for purposes of this study.

*Categoría asignada para fines del presente estudio.

Unlike other species distribution models, Maxent has the advantage of using presence-only species records, which facilitates the use of the information available in the databases consulted. The output format selected in Maxent was the logistic one, as the aim was to determine the probability of presence under the typical conditions of the species (Elith et al., 2011). Jackknife resampling was implemented to measure the degree of importance of the environmental variables in the potential distribution. Also, response curves showing the probability of plum presence in light of the variation in the different environmental factors were obtained.

Validation of the distribution models

For statistical validation, 30 % of the total presence points were randomly extracted, retaining the remaining 70 % for modeling, as proposed by Naoki, Gómez, López, Meneses, and Vargas (2006). The Maxent software provides an internal evaluation based on the area under the curve (AUC) parameter; however, four independent indices were used to assess the overall performance of the current species distribution model.

buenos resultados para el modelado de distribución de flora y fauna (Miller & Knouft, 2006; Trejo et al., 2011). La entropía, en este contexto, es definida como la medida de la cantidad de información considerada en la selección de un evento (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006). El algoritmo de Maxent analiza las condiciones donde la especie ha sido reportada al contrastar los puntos de presencia georreferenciados con las variables ambientales. Con ello se define un conjunto de requerimientos donde la especie puede habitar idóneamente, lo que se conoce como nicho ecológico (Soberón & Nakamura, 2009). Mediante funciones de regresión, el *software* estima la probabilidad de presencia de la especie en un sitio; lo que puede ser geográficamente traducido en una distribución potencial (Elith et al., 2011).

A diferencia de otros modelos de distribución de especies, Maxent cuenta con la ventaja de utilizar únicamente registros de presencia de la especie; lo cual facilita el uso de la información disponible en las bases de datos consultadas. El formato de salida seleccionado en Maxent fue el logístico, buscando con ello conocer la probabilidad de presencia bajo condiciones típicas

1) The sensitivity index is defined as the proportion of correctly predicted presences, where a high value indicates low error of omission, or type I error. 2) The specificity index is designed to determine the proportion of correctly predicted absences, where a high value indicates low error of commission, or type II error. 3) The positive predictive power (PPP) is the proportion of correctly predicted presences in relation to all locations. 4) The Kappa index is a global index that measures the degree of agreement between two estimators, where a high value indicates substantial agreement (Parra, Graham, & Freile, 2004).

All indices required obtaining a confusion matrix, which was generated and classified in accordance with the methodology of Landis and Koch (1977). A validation was also performed by geographical overlapping of the modeling results with the *S. purpurea* producing regions identified by Avitia-García et al. (2000) and with the potential distribution of *S. mombin* proposed by Pennington and Sarukhán (2005).

Mapping current and future potential suitability

Four suitability classes were defined as a function of the probability of species occurrence in the territory, as proposed by Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, and Tinoco-Rueda (2013). The 0-25 % probability range was called "unsuitable," 25-50% "marginal," 50-75% "suitable" and 75-100 % "optimal." For purposes of this study, suitability areas were defined as those having between 50 and 100 % probability of presence. These thresholds base their division on the arithmetic concept of quartiles and have been used in studies where the categorization of values is required. By using a geographic information system, information resulting from the Maxent software was processed and classified. The maps generated were intersected with Series V land-use and vegetation mapping (INEGI, 2013a).

Finally, every time the current scenarios for the species were obtained, 16 variables were replaced by those obtained under the aforementioned climate change models. The software was re-run and the new suitability areas were obtained and compared with the reference scenario.

Results and discussion

According to records analyzed in the databases, *S. mombin* was modeled with the higher number of presence points with 316, while *S. purpurea* only had 189. Despite the difference in the number of points used for modeling, the literature reports that the performance of the algorithm is not particularly sensitive to it, because species can be specialists or generalists and reflect that condition even with limited presence points (Elith et al., 2011).

de la especie (Elith et al., 2011). Se implementó un remuestreo común, o Jacknife, para medir el grado de importancia de las variables ambientales en la distribución potencial. Asimismo, se obtuvieron curvas de respuesta de la probabilidad de presencia de la ciruela ante la variación de los diferentes factores ambientales.

Validación de los modelos de distribución

Para la validación estadística se extrajo aleatoriamente 30% del total de puntos de presencia, conservando el 70 % restante para el modelado; tal como lo proponen Naoki, Gómez, López, Meneses, y Vargas (2006). El software Maxent provee de una evaluación interna basada en el parámetro de área bajo la curva (AUC); no obstante, se utilizaron cuatro índices independientes para evaluar el desempeño global del modelo de distribución actual de las especies. 1) El índice de sensibilidad se define como la proporción de presencias correctamente predichas, donde un valor alto indica error bajo de omisión, o error tipo I. 2) El índice de especificidad se aboca en determinar la proporción de ausencias correctamente predichas, un valor alto indica error bajo de comisión, o error tipo II. 3) El poder predictivo positivo (PPP) es la proporción de presencias correctamente predichas en relación con todas las localidades. 4) El índice Kappa es un índice global que mide el grado de acuerdo entre dos estimadores, donde un valor alto indica un acuerdo sustancial (Parra, Graham, & Freile, 2004).

Todos los índices requirieron de la obtención de una matriz de confusión; la cual fue generada y clasificada de acuerdo con la metodología de Landis y Koch (1977). Además, se recurrió a una validación mediante superposición geográfica de los resultados del modelado con las regiones productoras de *S. purpurea* señaladas por Avitia-García et al. (2000) y con la distribución potencial de *S. mombin* propuesta por Pennington y Sarukhán (2005).

Cartografía de aptitud potencial actual y futura

Se definieron cuatro clases de aptitud en función de la probabilidad de ocurrencia de las especies en el territorio, según lo propuesto por Monterroso-Rivas, Gómez-Díaz, y Tinoco-Rueda (2013). El rango de 0 a 25 % de probabilidad se denominó "inconveniente", de 25 a 50% "marginal", de 50 a 75% "conveniente" y de 75 a 100 % "óptimo". Para fines del presente estudio, las zonas aptas se definieron como aquellas que se encuentran entre 50 y 100 % de probabilidad de presencia. Estos umbrales basan su división en el concepto aritmético de cuartiles y han sido usados en estudios donde se requiere la categorización de valores. Mediante el uso de un sistema de información geográfica se procesó y clasificó la información resultante del software Maxent. Los mapas generados se intersectaron con la cartografía de uso de suelo y vegetación Serie V (INEGI, 2013a).

Among the validation indices, the specificity one showed the best performance by reporting values greater than 0.98, for both species. The Kappa index had acceptable values (>0.5), with *S. mombin* yielding the better result with 0.58 Kappa, while *S. purpurea* had 0.51 Kappa. The PPP index was 0.84 and 0.68 for *S. mombin* and *S. purpurea*, respectively. According to the classification of Landis and Koch (1977), these indices were placed in the moderate and substantial concordance categories. Also, the area under the curve parameter was higher than 0.9 in all cases, considered a good model fit to the presence points. Listed below are the results for each species studied.

Spondias purpurea

Mexican plum would find suitable sites for growing in 3.8 % of the national territory, according to the reference scenario, equivalent to about 7,400,00 ha. Of that area, 11 % is in the optimal suitability category and 89 % is in the suitable one. The average January temperature, the minimum temperature of the coldest period and thermal seasonality were the main variables that helped explain 63 % of the distribution of the species in the country. By also considering the kind of rock, elevation and soil unit, 81 % of the species' current presence can be explained. The importance of temperature for the species coincides with the report by Avitia-García et al. (2000), who state that cold is harmful to the species and that it only tolerates low temperatures for short periods of time, but they do not specify limits and time. In this sense, the high contribution of thermal seasonality in the modeling also has a reference in the literature, as it has been established that the Mexican plum requires that the difference between the hottest and coldest months does not exceed 10 °C (Avitia-García et al., 2000).

The presence of *S. purpurea* was found to be strongly related to climate group Aw, and its distribution proved to be predominant on the Pacific Ocean slope, in central Veracruz and the Yucatán Peninsula (Figure 1). Cruz-León et al. (2010) also located it primarily on the West Coast. Comparing the results obtained in this study with the distribution of plum producing areas in Mexico reported by Avitia-García et al. (2000), most coincide with suitable and optimal suitability categories found by the modeling.

Of the nine producing regions reported in the literature, five overlap in optimal areas (Nayarit, Jalisco-Colima, Oaxaca-Chiapas, Veracruz and Yucatán), two in suitable and marginal areas (Morelos and Guerrero) and two did not overlap (Sinaloa-Sonora and Tabasco). Regions reported as producers that do not match the present study were the border region between Sonora and Sinaloa and central Tabasco. The existence of *S. purpurea* in very wet or very dry

Por último, toda vez que se obtuvieron los escenarios actuales para las especies, se reemplazaron 16 variables por aquellas obtenidas bajo los modelos de cambio climático antes señalados. Se volvió a correr el *software* y las nuevas aptitudes se obtuvieron y compararon con el escenario base.

Resultados y discusión

De acuerdo con los registros analizados en las bases de datos, *S. mombin* se modeló con el mayor número de puntos de presencia con 316; mientras que *S. purpurea* sólo con 189. A pesar de la diferencia en el número de puntos utilizados para el modelado, la literatura reporta que el desempeño del algoritmo no es especialmente sensible a ello, pues las especies pueden ser especializadas o generalistas y reflejar esa condición aún con puntos de presencia limitados (Elith et al., 2011).

Dentro de los índices de validación, el de especificidad mostró el mejor desempeño al reportar valores superiores a 0.98, para ambas especies. El índice de Kappa se ubicó en valores aceptables (>0.5), siendo *S. mombin* la que arrojó el mejor resultado con 0.58 Kappa; mientras que *S. purpurea* reportó 0.51 Kappa. El índice de PPP fue de 0.84 y 0.68 para *S. mombin* y *S. purpurea*, respectivamente. Según la clasificación de Landis y Koch (1977), estos índices se ubicaron en categorías de acuerdo con moderadas y sustanciales. Asimismo, el parámetro de área bajo la curva fue superior a 0.9 en todos los casos; considerándose un buen ajuste del modelo a los puntos de presencia. A continuación se describen los resultados por cada especie estudiada.

Spondias purpurea

La ciruela mexicana encontraría sitios aptos para su desarrollo en 3.8 % de la superficie nacional, según el escenario base; lo que implica cerca de 7 millones 400 mil hectáreas. De esa superficie, 11 % se encuentra en la categoría de aptitud óptima y 89 % se ubica en conveniente. La temperatura media de enero, la temperatura mínima del periodo más frío y la estacionalidad térmica fueron las principales variables que contribuyeron a explicar 63 % de la distribución de la especie en el país. Si se considera el tipo de roca, la altitud y el tipo de suelo, se logra explicar la presencia actual en 81 %. La importancia de la temperatura para la especie coincide con el texto de Avitia-García et al. (2000), donde describen que el frío le es perjudicial y que sólo resiste temperaturas bajas por periodos cortos de tiempo, aunque no especifica los límites y el tiempo. En este sentido, la contribución alta de la estacionalidad térmica en el modelado también encuentra un referente en la literatura, pues se ha establecido que la ciruela mexicana requiere que la diferencia entre los meses más fríos y los más calientes no rebase los 10 °C (Avitia-García et al., 2000).

climates is closely related to anthropogenic effects, as Cruz-León et al. (2010) have established that the presence of this species in very wet climates can only be due to human action.

In total, 53 % of the suitability areas were located in primary and secondary vegetation of low-height deciduous forest, in secondary arboreal vegetation of medium-height sub-deciduous forest and in rainfed agriculture and cultivated pastures. This is consistent with several studies that associate the presence of *S. purpurea* with low-height deciduous forest (Ruenes-Morales, Casas, Jiménez-Orsorio, & Caballero, 2010; Rzedowski, 2006). On the other hand, Avitia-García et al. (2000) describe it as a species that forms part of the secondary vegetation derived from tall or medium-height sub-deciduous or deciduous forests. Cultivated pasture has been one of the major changes that humans have made in low-height deciduous forest areas for livestock activities according to Castelán, Ruiz, Linares, Pérez, and Tamariz (2007), so a reference was found for the important presence of this species in this land-use class.

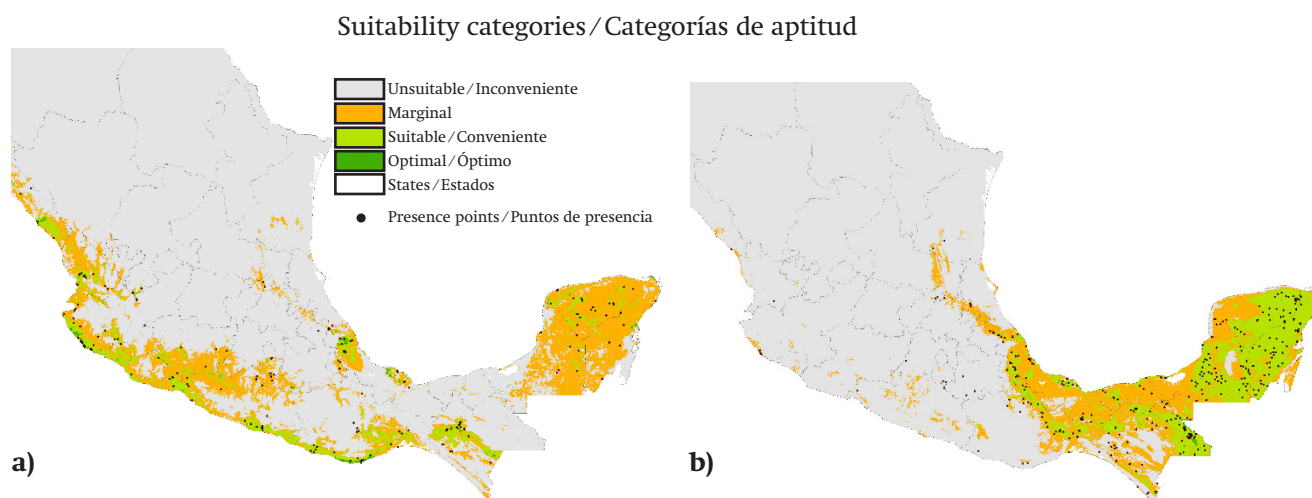
Land-use classes solely related to human activity make up 31 % of all suitability areas. However, natural vegetation classes associated with the presence of the species account for 40.9 % of suitability areas (10 % more than those related to human activities). This suggests that despite human intervention it has not been fully domesticated and still prefers its wild niche. This is consistent with the observations of Hernández-Bermejo and León (1992), who highlighted the semi-domesticated character of the species.

Regarding the results obtained with climate change, the main areas of change in terms of suitability would be recorded in Sinaloa, Nayarit, northern Veracruz, and the northern strip of the state of Puebla. According to the

La presencia de *S. purpurea* se encontró fuertemente relacionada con el tipo de clima Aw, y su distribución resultó ser predominante en la vertiente del océano Pacífico, en el centro de Veracruz y la Península de Yucatán (Figura 1). Cruz-León et al. (2010) también la ubican prioritariamente en la costa oeste. Comparando los resultados obtenidos en este estudio con la distribución de zonas productoras de ciruela en México reportadas por Avitia-García et al. (2000), la mayoría coincide con categorías de aptitudes conveniente y óptima arrojadas por el modelado.

De las nueve regiones productoras reportadas en la literatura, cinco se sobreponen en zonas óptimas (Nayarit, Jalisco-Colima, Oaxaca-Chiapas, Veracruz y Yucatán), dos en zonas convenientes y marginales (Morelos y Guerrero) y dos no se sobreponen (Sinaloa-Sonora y Tabasco). Las regiones reportadas como productoras que no coinciden con el presente estudio fueron la región fronteriza entre Sonora y Sinaloa y el centro de Tabasco. La existencia de *S. purpurea* en climas muy húmedos o muy secos tiene estrecha relación con efectos antrópicos, pues Cruz-León et al. (2010) ha establecido que la presencia de esta especie en climas muy húmedos sólo puede deberse a la acción humana.

El 53 % de las zonas aptas estuvieron ubicadas en vegetación primaria y secundaria de selva baja caducifolia, en vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia y en agricultura de temporal y pastizales cultivados. Ello concuerda con diversos estudios que asocian la presencia de *S. purpurea* a la selva baja caducifolia (Ruenes-Morales, Casas, Jiménez-Orsorio, & Caballero, 2010; Rzedowski, 2006). Por otro lado, Avitia-García et al. (2000) la describen como una especie que forma parte de la vegetación secundaria, derivada de los tipos de selvas altas o medianas subcaducifolias o caducifolias. El pastizal cultivado ha



**Figure 1. Current potential distribution for *Spondias spp.* in Mexico, a) *S. purpurea* and b) *S. mombin*.
Figura 1. Distribución potencial actual para *Spondias spp.* en México, a) *S. purpurea* y b) *S. mombin*.**

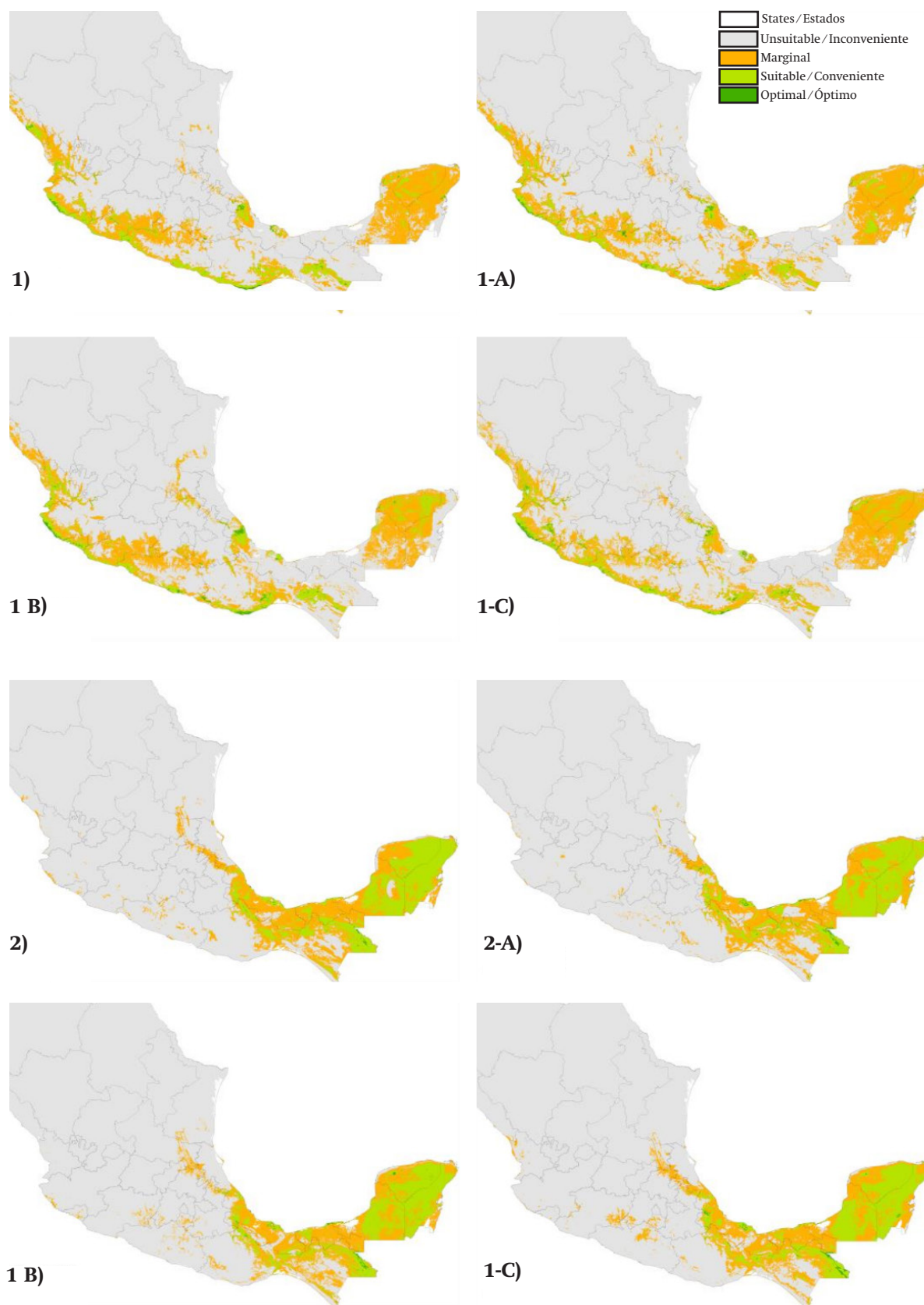


Figure 2. Potential distribution with climate change for *Spondias* spp. at a distant horizon under RCP 8.5 W·m⁻²: 1) *S. purpurea* and 2) *S. mombin*. Scenarios: A) GFDL_CM3, B) HADGEM2_ES and C) Ensemble REA.
Figura 2. Distribución potencial con cambio climático para *Spondias* spp. al horizonte lejano bajo RCP de 8.5 W·m⁻²: 1) *S. purpurea* y 2) *S. mombin*. Escenarios: A) GFDL_CM3, B) HADGEM2_ES y C) Ensemble REA.

spatial distribution reported under climate change models at $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, the area of *S. purpurea* would decrease by 10.3 % and 5.1 % in the optimal and suitable classes respectively, considering the average of the three models. Adding up the suitable and optimal areas, an overall 5.7 % decrease in the suitability area for the species is expected. Figure 2 shows the potential distribution of both species with climate change scenarios.

All models agreed in predicting a decrease in optimal areas. The most optimistic was GFDL in finding a 7.7 % decrease, the HADGEM was the most pessimistic by considering a 14.6 % drop and the REA was at an intermediate point by finding a 8.5 % decrease. The climate change scenarios showed agreement in predicting an increase in marginal areas, with 5.7, 3.4 and 8.1 % for the REA, HADGEM and GFDL models, respectively. The increase in this category is because suitable areas would cease to be so and would be located in lower suitability categories, according to the climate change scenarios.

Spondias mombin

According to the baseline scenario, *S. mombin* could be potentially distributed in 6.6 % of the national territory, equivalent to 12,900,000 ha. However, of that area, only 1 % is in the optimal category, while the rest is in the suitable one. Although the distribution of a species is associated with environmental features and ecological interactions, collecting a larger number of specimens at certain sites may be influenced by human interest. In this regard, Ruenes-Morales et al. (2010) have documented the presence of the genus *Spondias* in the Yucatán Peninsula, which could have led to an oversampling in that area.

The variables that contributed most to modeling the presence of the species were the minimum temperature of the coldest period, average monthly rainfall in April and annual thermal oscillation, contributing 66 % to the model. If the influence of the tropics and the type of rock is added, 85 % of the distribution of the species is explained. In this regard, von Carlowitz et al. (1991) state that the average temperature should be 25.5°C and the minimum 16°C . On the other hand, Orwa, Mutua, Kindt, Jamnadass, and Anthony (2009) specify that *S. mombin* is severely damaged by low temperatures, and although the limit is not specified, it matches this study. The distribution of the species was influenced by Am-group climates, so an increased probability of presence was recorded in the humid areas of Veracruz, Tabasco and Chiapas, in addition to covering almost the entire Yucatán Peninsula. For their part, Quintana Roo, Campeche and Yucatán account for 65 % of the areas suitable for *S. mombin*. If Chiapas is added to the above states, 81 % of the total national area is reached. It has been documented that *S. mombin* is distributed in warm humid areas (Pennington & Sarukhán, 1998).

sido uno de los principales cambios que el ser humano ha infringido en zonas de selvas bajas caducifolias para actividades ganaderas según Castelán, Ruiz, Linares, Pérez, y Tamariz (2007), por lo que la presencia importante de esta especie en dicha clase de uso de suelo encuentra un referente.

Tomando en cuenta sólo las clases de uso de suelo relacionadas con la actividad humana, se suma un total de 31 % de zonas aptas. No obstante, las clases de vegetación natural asociadas con la presencia de la especie alcanzan 40.9 % de zonas aptas (10 % más que las relacionadas con actividades antrópicas). Lo anterior sugiere que a pesar de la intervención humana no se ha domesticado completamente y sigue prefiriendo su nicho silvestre. Ello concuerda con lo establecido por Hernández-Bermejo y León (1992), donde se destaca el carácter semi domesticado de la especie.

Respecto de los resultados obtenidos con cambio climático, las principales zonas de modificación en la aptitud se registrarían en Sinaloa, Nayarit, el norte de Veracruz y la franja norte del estado de Puebla. De acuerdo con la distribución espacial reportada bajo los modelos de cambio climático a $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, la superficie de *S. purpurea* disminuiría 10.3 % y 5.1 % en las clases óptimas y convenientes, respectivamente, considerando el promedio de los tres modelos. Sumando las áreas convenientes y óptimas se prevé la disminución generalizada de 5.7 % de la superficie idónea para la especie. La Figura 2 muestra la distribución potencial de ambas especies con escenarios de cambio climático.

Todos los modelos coincidieron en prever la disminución de zonas óptimas. El más optimista fue GFDL al arrojar un decremento de 7.7 %, el HADGEM fue el más pesimista al considerar 14.6 % menos y el REA se situó en un punto intermedio al arrojar 8.5 % de disminución. Los escenarios de cambio climático mostraron acuerdo en el aumento de las zonas marginales, con 5.7, 3.4 y 8.1 % para los modelos REA, HADGEM y GFDL, respectivamente. El incremento de esta categoría se debe a que las zonas aptas dejarían de serlo y se ubicarían en menores categorías de aptitud, según los escenarios de cambio climático.

Spondias mombin

De acuerdo con el escenario base, *S. mombin* podría distribuirse potencialmente en 6.6 % del territorio nacional; lo que equivale a 12 millones 900 mil hectáreas. No obstante, de dicha superficie sólo el 1 % se encuentra en categoría óptima; mientras que el resto se ubica conveniente. A pesar de que la distribución de una especie está asociada con características ambientales e interacciones ecológicas, la colecta de mayor número de ejemplares en determinados sitios puede estar influenciada por el interés humano. En este

The three land-use types that account for most of the suitable area for the production of *Spondias spp.* are the secondary tree vegetation of the medium-height sub-deciduous and deciduous forest and cultivated pasture, adding up to 52 % of the national total. These results are consistent with studies reported for the species, where it has been documented that it is found associated with secondary vegetation of tall or medium-height evergreen and sub-evergreen forests and of medium-height sub-deciduous forests (Avitia-García et al., 2000). Cruz-León et al. (2010) describe it as common in secondary forests and present in primary forests.

The climate change scenarios project an average overall decrease of 13.3 % in suitable areas for *S. mombin*. Of the three models, the GFDL was the most pessimistic by predicting a 16.9 % decrease, the REA was more optimistic by forecasting an 8 % drop and the HADGEM model projected a 14.8 % decline. Considering climate change scenarios (Figure 2), it is expected that the main areas of change, according to the GFDL model, relative to the baseline scenario, will be Yucatán, Quintana Roo, Campeche and Veracruz, whereas the HADGEM model predicts changes in Yucatán, Quintana Roo, Veracruz and Chiapas and the REA model reports potential changes basically in the Yucatán peninsula.

Figure 3 shows the change trends in the suitability categories by species. *S. mombin* would increase its suitability areas by 65.8 %, which is the average of the three models. The suitability areas tend to increase under climate change scenarios due to the decreased susceptibility of *Spondias spp.* to low temperatures, a limiting factor which has been widely reported by various studies (Avitia-García et al., 2000; Cruz-León et al., 2010; von Carlowitz et al., 1991). However, this increase should be viewed with caution since it represents a very limited area (135,000 ha).

Considering only the optimal areas, the REA model is the most optimistic by predicting an increase of 107.4 %, while the GFDL projects an increase of 40.7 %. On the other hand, areas with the suitable category provide a differentiated decrease of 17.8, 15.9 and 9.9 %, according to the GFDL, HADGEM and REA models, respectively. The average change decrease in this category was 14.5 %, according to the projections by the three models. The area defined as marginal would increase by an average of 3.8 %, with the GFDL predicting the greatest change (5.8 %). Although the variation in unsuitable areas is projected to average 0.7 % in terms of area, there would be 1,131,000 ha with very poor conditions for the development of *S. mombin*.

Final comments

According to the climate change scenarios, the GFDL model proved to be the most severe in terms

sentido Ruenes-Morales et al. (2010) han documentado la presencia del género *Spondias* en la península de Yucatán, lo que pudo haber conducido a un sobre muestreo en dicha zona.

Las variables que contribuyeron más a modelar la presencia de la especie fueron la temperatura mínima del periodo más frío, la precipitación media mensual de abril y la oscilación térmica anual, sumando 66 % de contribución al modelo. Si se agrega la influencia del trópico y el tipo de rocas, se alcanza a explicar la distribución de la especie en 85 %. Al respecto, von Carlowitz et al. (1991) establecen que la temperatura promedio deberá ser de 25.5 °C y la mínima de 16 °C. Por otro lado, Orwa, Mutua, Kindt, Jamnadass, y Anthony (2009) especifican que *S. mombin* es dañada severamente con bajas temperaturas, y aunque no se especifica el límite, coincide con este estudio. La distribución de la especie estuvo influenciada por climas tipo Am; por lo que se registró probabilidad mayor de presencia en las zonas húmedas de Veracruz, Tabasco y Chiapas, además de abarcar casi toda la Península de Yucatán. Por su parte, Quintana Roo, Campeche y Yucatán concentraron 65 % de las superficies aptas para *S. mombin*. Si a los anteriores estados se suma Chiapas se alcanza 81 % del total de la superficie nacional. Se ha documentado que *S. mombin* se distribuye en zonas cálidas húmedas (Pennington & Sarukhán, 1998).

Los tres tipos de uso de suelo que concentran la mayor superficie apta para la producción de *Spondias spp.* son la vegetación secundaria arbórea de la selva mediana subperennifolia y subcaducifolia y el pastizal cultivado, sumando 52 % del total nacional. Estos resultados coinciden con estudios reportados para la especie, donde se ha documentado que se encuentra asociada con vegetación secundaria de selvas altas o medianas perennifolias y subperennifolias y medianas subcaducifolias (Avitia-García et al., 2000). Por su parte, Cruz-León et al. (2010) la describen como común en bosques secundarios y presente en bosques primarios.

Los escenarios de cambio climático prevén la disminución generalizada de las zonas aptas para *S. mombin* en 13.3 %, en promedio. De los tres modelos, el GFDL fue el más pesimista al considerar una disminución de 16.9 %, el REA fue más optimista al prever 8 % menos y el modelo HADGEM proyectó 14.8 % menos. Considerando escenarios de cambio climático (Figura 2), se prevé que las principales zonas de cambio, de acuerdo con el modelo GFDL, en relación con el escenario base sean Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Veracruz, el modelo HADGEM predice cambios en Yucatán, Quintana Roo, Veracruz y Chiapas y el modelo REA reporta cambios potenciales en la península de Yucatán, fundamentalmente.

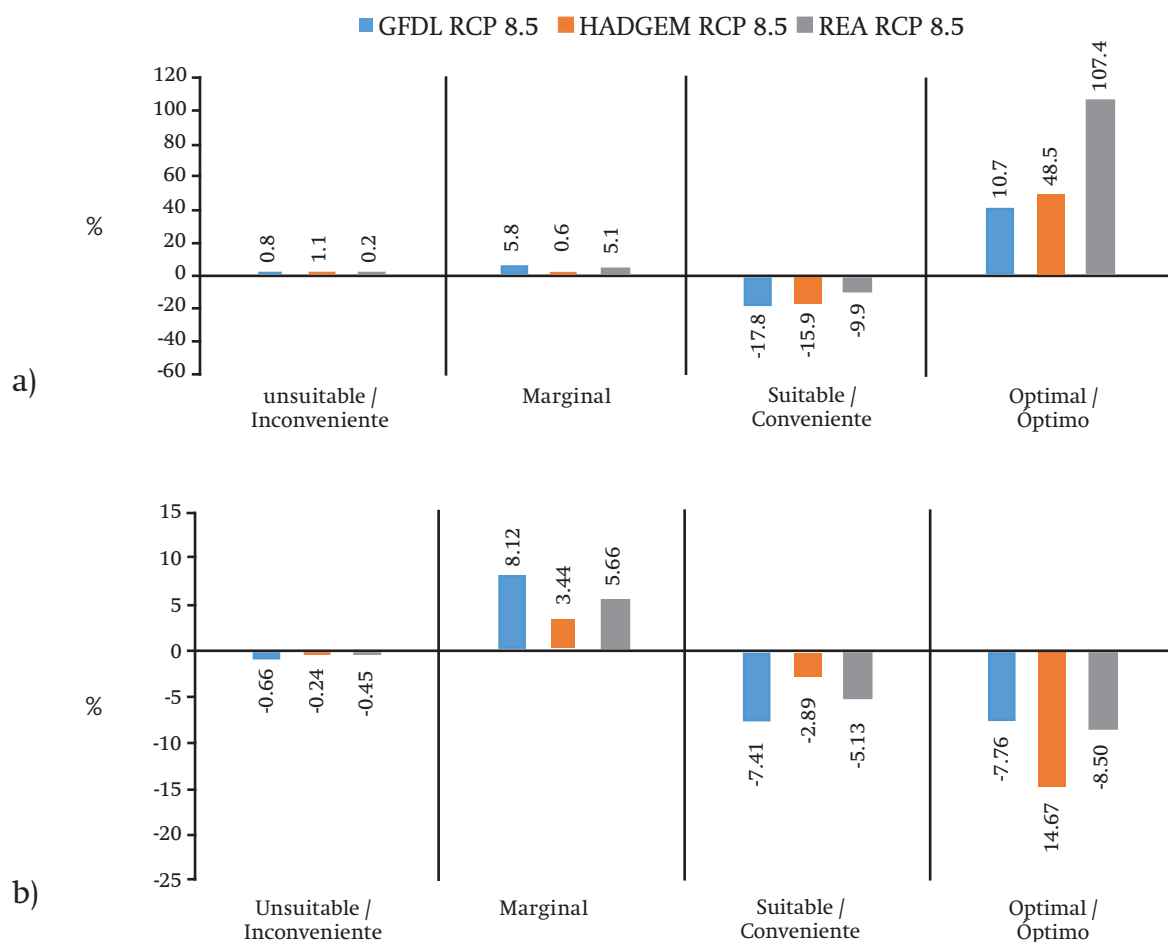


Figure 3. Changes in suitability categories according to climate scenarios, a) *S. mombin* and b) *S. purpurea*.
Figura 3. Cambios en categorías de aptitud según escenarios climáticos, a) *S. mombin* y b) *S. purpurea*.

of suitability by projecting a 12.2 % decrease in the suitable area, considering both species. The HADGEM is at an intermediate point by predicting a 9.5 % decrement in suitability areas. The REA model was the most optimistic in finding a 6.8 % drop. Areas with some degree of suitability (sum of optimal and suitable categories) would decrease on average by 5.7 and 13.3 % for *S. purpurea* and *mombin*, respectively, which means the latter species is the more vulnerable of the two studied. Figure 4 provides a comparison of the suitability classes according to each climate change scenario assessed.

Further research is needed to broaden our understanding of the impact of the main factors affecting the distribution of these species. This, in turn, will enable identifying, proposing and evaluating measures aimed at adapting to or mitigating climate change within the context of rescuing plant genetic resources native to Mexico.

Conclusions

Ecological niche and potential distribution modeling reaffirmed what has been reported on the susceptibility of

La Figura 3 muestra las tendencias de cambio en las categorías de aptitud por especie. *S. mombin* incrementaría 65.8 % sus zonas más aptas, en promedio de los tres modelos. Es posible explicar que las zonas aptas tiendan a aumentar bajo escenarios de cambio climático; esto debido a la disminución de la susceptibilidad de *Spondias spp.* a las temperaturas bajas, limitante que ha sido ampliamente reportada por diversos estudios (Avitia-García et al., 2000; Cruz-León et al., 2010; von Carlowitz et al., 1991). No obstante, dicho incremento debe considerarse con precaución, pues representa una superficie muy limitada (135 mil hectáreas).

Considerando únicamente las zonas óptimas, el modelo REA es el más optimista al plantear un incremento de 107.4 %; mientras que el GFDL proyecta un aumento de 40.7 %. Por otro lado, las zonas con categoría conveniente prevén disminución diferenciada de 17.8, 15.9 y 9.9 %, según los modelos GFDL, HADGEM y REA, respectivamente. El promedio de disminución de cambio en esta categoría fue de 14.5 %, de acuerdo con lo proyectado por los tres modelos. La superficie definida como marginal incrementaría en promedio 3.8 %, siendo el GFDL el que prevé mayor cambio (5.8 %).

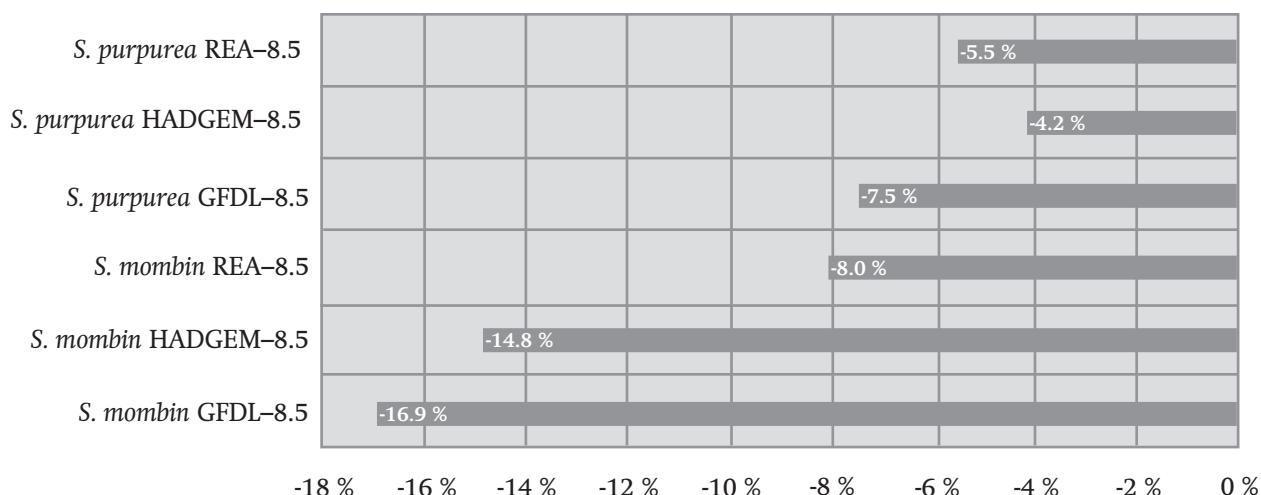


Figure 4. Percentage changes in area with suitability for *Spondias* spp. under climate change scenarios and RCPs.
Figura 4. Cambios porcentuales en superficie con aptitud para *Spondias* spp. bajo escenarios de cambio climático y RCP's.

Spondias spp. to low temperatures, to the precipitation of certain months and to rapid changes in temperature in some seasons of the year. Also, the relationship of *S. purpurea* with medium- and low-height deciduous forests and *S. mombin* with medium-height and tall evergreen forests was confirmed. The potential distribution obtained agreed in most cases with that reported in the literature.

In the reference scenario, *S. mombin* had a larger suitable area for development. Under climate change scenarios, *S. purpurea* recorded the largest percentage decreases in optimal areas; however, *S. mombin* showed the highest decrease in suitability areas, being the more vulnerable within the scope of this study. Comparatively, the GFDL model projected greater negative changes, while the REA even foresaw positive variations in the potential distribution of the two species.

Acknowledgements

The authors thank the compiler and collector for having provided field information on the presence of the species; without this contribution it would not been possible to carry out this study. In addition, the financial support received from the Universidad Autónoma Chapingo (Chapingo Autonomous University), through the PROFONI program and Strategic Institutional projects, is appreciated.

A pesar de que la variación en las zonas inconvenientes se proyecte en promedio con 0.7 %, en términos de superficie se tendrían 1 millón 131 mil hectáreas con muy pobres condiciones para el desarrollo de *S. mombin*.

Comentarios finales

De acuerdo con los escenarios de cambio climático, el modelo GFDL resultó ser el más severo en términos de aptitud al proyectar disminuciones de 12.2 % de la superficie apta, considerando ambas especies. El HADGEM se sitúa en un punto intermedio al prever decrementos de 9.5 % en las zonas aptas. Por su parte, el modelo REA fue el más optimista al arrojar 6.8 % menos. Las superficies con algún grado de aptitud (suma de categorías óptima y conveniente) disminuirían en promedio 5.7 y 13.3 % para *S. purpurea* y *mombin*, respectivamente; lo que coloca a esta especie como la más vulnerable dentro de este estudio. La Figura 4 proporciona la comparativa de las clases aptas de acuerdo con cada escenario de cambio climático evaluado.

Es necesario continuar realizando estudios que permitan ampliar el conocimiento del impacto de los principales factores que afectan la distribución de estas especies. Lo anterior con el fin de determinar, proponer y evaluar medidas de adaptación o mitigación al cambio climático dentro del contexto del rescate de los recursos fitogenéticos nativos de México.

Conclusiones

El modelado de nicho ecológico y distribución potencial reafirmó lo reportado acerca de la susceptibilidad de *Spondias* spp. a bajas temperaturas, a la precipitación de ciertos meses y a cambios vertiginosos de la temperatura en algunas estaciones del año. Asimismo, se corroboró la relación de *S. purpurea* con selvas

End of English version

References / Referencias

- Avitia-García, E., González-Castillo, A. M., & Pimienta-Barrios, E. (2000). *Ciruela mexicana y otras especies del género Spondias L.* Ciudad de México: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia.
- Castelán, R., Ruiz, J., Linares, G., Pérez, R., & Tamariz, V. (2007). Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, 64 (Boletín del Instituto de Geografía), 75-89. doi: 10.14350/rig.17967
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto-González, R., & Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambioclimático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC*. Retrieved from <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>
- Cianfrani, C., Satizábal, H. F., & Randin, C. (2015). A spatial modelling framework for assessing climate change impacts on freshwater ecosystems: Response of brown trout (*Salmo trutta* L.) biomass to warming water temperature. *Ecological Modelling*, 313, 1-12. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.023
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2012). *Spondias mombin L. Sistema de Información para la Reforestación (SIRE)*. Zapopan, Jalisco: Author. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1003Spondias mombin.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2009). Conjunto de datos vectoriales del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009. Zapopan, Jalisco: Author.
- Conde, C., Estrada, F., & Martínez, B. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera*, 24(1), 125-140. Retrieved from <http://www.journals.unam.mx/index.php/atm/article/view/23806>
- Cruz-León, A., Pita-Duque, Á., & Rodríguez-Haros, B. (2010). *Jocotes, jobos, abales o ciruelas mexicanas*. Chapingo, México: Centros Regionales. Universidad Autónoma Chapingo.
- Cuevas-Sánchez, A. (1992). *Jocote, ciruelo (Spondias purpurea)*. In: *Cultivos marginados. Otra perspectiva de 1492* (pp. 339). Roma, Italia: FAO.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., & Romero, C. R. (2009). *Atlas climático digital de México*. México. Retrieved from <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2015). *GBIF Occurrence download*. Acceso en septiembre 28, 2015. Retrieved from <http://www.gbif.org>
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, 21(1), 35-56.
- Gómez-Díaz, J., Monterroso-Rivas, A., & Tinoco-Rueda, J. (2007). Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y medianas y bajas caducifolias y de *S. mombin* con selvas medianas y altas perennifolias. La distribución potencial obtenida concordó en la mayoría de los casos con aquella reportada por la literatura.
- En el escenario base, *S. mombin* reportó mayor superficie con aptitudes para su desarrollo. Con los escenarios de cambio climático, *S. purpurea* registró los mayores porcentajes de disminución en sus zonas óptimas; sin embargo, *S. mombin* presentó el mayor decremento de superficies aptas, siendo la más vulnerable dentro del ámbito de este estudio. Comparativamente, el modelo GFDL proyectó mayores cambios negativos, mientras que el REA incluso previó variaciones positivas en la distribución potencial de las especies.
- ## Agradecimientos
- Los autores agradecen al compilador y colector haber facilitado información de campo sobre la presencia de la especie; sin esta aportación el trabajo no habría podido desarrollarse. Asimismo, se agradece el apoyo financiero recibido por la Universidad Autónoma Chapingo, a través del programa PROFONI y proyectos Estratégicos Institucionales.
- ## Fin de la versión en español
-
- escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 13(2), 29-49. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61713204>
- Hernández-Bermejo, J. E., & León, J. (1992). Cultivos marginados: otra perspectiva de 1492. *Producción y protección vegetal* (vol. 26). Roma, Italia: FAO.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos Serie II*. Aguascalientes, México: Author. Retrieved from www.inegi.org.mx
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación Serie V*. Aguascalientes, México: Author. Retrieved from www.inegi.org.mx
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2013b). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0*. Ciudad de México: Author. Retrieved from www.inegi.org.mx
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Parte de la contribución del grupo de trabajo I al tercer informe de evaluación grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Cambridge, U.K.: Author.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Parte de la contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. doi: 10.2307/2529310
- Miller, A. J., & Knouft, J. H. (2006). GIS-based characterization of the geographic distributions of wild and cultivated populations of the mesoamerican fruit tree *Spondias purpurea* (Anacardiaceae). *American Journal of Botany*, 93(12), 1757-1767. doi: 10.3732/ajb.93.12.1757
- 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
- Naoki, K., Gómez, M. I., López, R. P., Meneses, R. I., & Vargas, J. (2006). Comparación de modelos de distribución de especies para predecir la distribución potencial de vida silvestre en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 41(1), 65-78. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282006000700005
- O'Donnell, M., & Ignizio, D. (2012). *Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States*. Fort Collins, USA: U.S. Geological Survey Data Series 691. Retrieved from <http://pubs.usgs.gov/ds/691>
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R., & Anthony, S. (2009). *Agroforestree Database: a tree reference and selection guide version 4.0*. Kenya: World Agroforestry Centre. doi: 10.1007/978-1-4020-4585-1_2577
- Parra, J., Graham, C., & Freile, J. (2004). Evaluating alternative data sets for ecological niche models of birds in the Andes. *Ecography*, 27(3), 350-360. doi: 10.1111/j.0906-7590.2004.03822.x
- Pennington, T., & Sarukhán, J. (1998). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies*. (Segunda Ed). Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Pennington, T., & Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies* (Tercera Ed). Ciudad de México: UNAM, Fondo de Cultura Económica.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & 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
- Ruenes-Morales, M., Casas, A., Jiménez-Osornio, J. J., & Caballero, J. (2010). Etnobotánica de *Spondias purpurea* L. (anacardiaceae) en la península de Yucatán. *Interciencia*, 35(4), 247-254. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913156003>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1a Edición). Ciudad de México: CONABIO.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 19644-19650. doi: 10.1073/pnas.0901637106
- Trejo, I., Martínez-Meyer, E., Calixto-Pérez, E., Sánchez-Colón, S., Vázquez-de la Torre, R., & Villers-Ruiz, L. (2011). Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México. *Atmósfera*, 24(1), 1-14. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56519179002>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5-31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Villers-Ruiz, L., & Trejo-Vázquez, I. (2003). *El cambio climático y la vegetación en México*. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM. Retrieved from http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/cambio_climatico/forestales.pdf
- Von Carlowitz, P. G., Wolf, G. V., & Kemperman, R. E. M. (1991). *The multipurpose and shrub database. An information and decision support system*. Nairobi, Kenya: ICRAF. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=QI9100253>