



Artículo / Article

Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico

Potential distribution of *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston based on an ecological niche model

Abraham Palacios Romero¹, Rodrigo Rodríguez Laguna², María de la Luz Hernández Flores¹,
Edith Jiménez Muñoz¹ y David Tirado Torres¹

Resumen

Prosopis laevigata es una especie con amplia distribución en zonas áridas del norte y centro de México; desde el punto de vista ambiental es muy útil pues previene los procesos de desertificación y erosión por su alta capacidad de retención del suelo, de mejoramiento de la fertilidad y de estabilizar la salinidad. Es fuente de alimento y refugio para la fauna silvestre y produce diversos bienes para el ser humano, por lo que ha sido sobreexplotada desde hace décadas en el país; por lo tanto, es ya necesario determinar zonas potenciales para su establecimiento. Para ello, se trabajó con la distribución potencial de esta especie en tres provincias fisiográficas. Se recabaron datos espaciales de avistamientos registrados en la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) y se seleccionó el modelo de nicho ecológico BIOCLIM, que fue aplicado en el programa DIVA-GIS ver. 7.5. Se le validó con un análisis de área bajo la curva (ROC) y el estimador *Kappa*. Los resultados sugieren que *P. laevigata* puede crecer de manera óptima en 15 % de las provincias (70 632.08 km²) y los factores más limitantes que enfrenta son la estacionalidad de precipitación (9.25 %) y la temperatura (11.43 %). Los análisis ROC y *Kappa* indican que el modelo utilizado tiene un excelente desempeño y una alta probabilidad de acierto (ROC = 0.973; *Kappa* = 0.915), por lo que estas fórmulas son adecuadas para determinar áreas potenciales para el desarrollo de la especie.

Palabras clave: BIOCLIM, distribución espacial, mezquite, nicho ecológico, *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston, reforestación.

Abstract

Prosopis laevigata is a widely distributed species in arid zones of northern and central Mexico. It is very useful from the environmental point of view, as it prevents desertification and erosion processes due to its high soil-holding capacity, as well as its capacity to improve fertility and to stabilize salinity levels. It is a source of food and provides shelter to wildlife; furthermore, various goods for consumption by human beings are produced from this species, so it has been overexploited for decades in Mexico. Therefore, it has become necessary to determine potential areas for its establishment. For this purpose, the potential distribution of this species in three physiographic provinces was studied. Spatial data on sightings recorded in the World Network of Information on Biodiversity (REMIB, for its acronym in Spanish), and with the BIOCLIM ecological niche model were selected and applied with the DIVA-GIS 7.5 software. They were validated with an analysis of the area under the ROC curve and using the *Kappa* estimator. The results suggest that *P. laevigata* can grow optimally in 15 % of the provinces (70 632.08 km²), and that the most limiting factors it faces are the seasonality of precipitation (9.25 %) and the temperature (11.43 %). Both the ROC analysis and *Kappa* indicate that the utilized model has an excellent performance and a high probability of accuracy (ROC = 0.973; *Kappa* = 0.915); therefore, these formulas are adequate to determine potential areas for the development of this species.

Key words: BIOCLIM, spatial distribution, mesquite, ecological niche, *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston, reforestation.

Fecha de recepción/Received date: 5 de octubre de 2015; Fecha de aceptación/Accepted date: 11 de enero de 2016.

¹ Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. Correo-e: abraham.palacios.romero@gmail.com

² Instituto de Ciencias Agropecuarias. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.

Introducción

A nivel mundial existe una preocupación por los cambios que se están produciendo en la estructura y composición vegetal de los ecosistemas debido a las actividades antrópicas (FAO, 2011). Aunado a lo anterior, la sobreexplotación y el mal uso de los ecosistemas forestales provoca una pérdida de calidad en los servicios ambientales como son la fijación de emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de la calidad de las aguas, la erosión y la desertificación de los suelos, entre otras cosas, lo que pone en riesgo la forma de vida e integridad cultural de las poblaciones que dependen directamente de los bosques (López, 2012).

En México se estima una disminución de alrededor de 155 mil ha de bosques y selvas por año (UANL, 2009a). De seguir este ritmo, para el año 2050 se habrá eliminado la totalidad de las zonas forestales (Cortesi, 2002). Por ello, a la fecha se realizan diversos programas de reforestación para prevenir dicho escenario (Semarnat, 2004; UANL, 2009b; UACH, 2010).

Una herramienta valiosa que se utiliza en las investigaciones sobre conservación biológica es la estimación de las áreas de distribución potencial de las especies para establecer plantaciones forestales (Austin, 2007; Soberón y Nakamura, 2009).

La distribución espacial de las especies depende de su amplitud ecológica (capacidad de tolerancia a factores ambientales como temperatura, precipitación, humedad, posición topográfica y altitud) (Finch *et al.*, 2006). A partir de esta amplitud, es posible medir la probabilidad de presencia en un espacio geográfico específico (Plamen y Stoyanov, 2005).

Algunos métodos de análisis permiten determinar las áreas de distribución de taxa con interés ambiental y ecológico (Hijmans *et al.*, 2005). Estos modelos predictivos simplifican el concepto de nicho ecológico, al tomar en cuenta los factores ambientales de las localidades de recolección de las especies con intención de reproducirlo (Finch *et al.*, 2006).

Prosopis laevigata Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston es una especie arbórea con amplia distribución en zonas áridas y semiáridas del norte y centro de la república mexicana (Villanueva *et al.*, 2004). Sus raíces pueden tener más de 50 m de profundidad y hasta 15 m en sus laterales (Ríos *et al.*, 2011). Funciona como fuente de alimento y provee refugio para la fauna silvestre. Las comunidades humanas la han utilizado como alimento también y como material combustible. Desde el punto de vista ambiental, es una especie muy útil pues previene los procesos de desertificación y erosión por su alta capacidad de retención del suelo, mejora la fertilidad y ayuda a estabilizar la salinidad (Rodríguez *et al.*, 2014).

Introduction

At world level, there is a concern due to the changes that are being produced in the structure and vegetal composition of ecosystems as a result of anthropic activities (FAO, 2011). Furthermore, the overexploitation and misuse of forest ecosystems is causing a loss of quality in such environmental services as the setting of limits to greenhouse gas emissions, the reduction of the water quality, soil erosion and desertification, among other things that put at risk the livelihood and cultural integrity of those populations that depend directly on forests (López, 2012).

A reduction of 155 thousand has of forests and rainforests is estimated to occur in Mexico every year (UANL, 2009a). If reduction of these ecosystems continues at the same rate, by 2050 all of the forest areas will have been eliminated (Cortesi, 2002). Several programs are in place to prevent this scenario (Semarnat, 2004; UANL, 2009b; UACH, 2010).

A valuable tool utilized in research on biological conservation is the estimation of the potential species distribution areas in order to establish forest plantations (Austin, 2007; Soberón and Nakamura, 2009).

The spatial distribution of species depends on their ecological amplitude (tolerance to environmental factors like temperature, precipitation, humidity, topographic position and altitude) (Finch *et al.*, 2006). Based on this amplitude, it is possible to measure the probability of their presence in a specific geographical space (Plamen and Stoyanov, 2005).

Certain analysis methods allow determining distribution areas of species of environmental interest (Hijmans *et al.*, 2005). These predictive models simplify the concept of ecological niche by taking into account environmental factors of the harvest locations of the species in order to reproduce it (Finch *et al.*, 2006).

Prosopis laevigata Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston is an arboreal species with a wide distribution in arid and semi-arid areas of the north and center of Mexico (Villanueva *et al.*, 2004). Its roots may be over 50 m deep and extend laterally up to 15 m (Ríos *et al.*, 2011). It works as a source of food and provides shelter for wildlife. Human communities have used it both as food and as fuel. From the environmental point of view, it is a very useful species because it prevents desertification and erosion processes due to its high soil-holding capacity and because it improves fertility and helps stabilize salinity levels (Rodríguez *et al.*, 2014).



A partir de la explotación de la que ha sido objeto a través de los años por la gran variedad de usos actuales y potenciales, *P. laevigata* presenta una tasa de disminución de su superficie en varios estados del país, lo que es particularmente notorio en Coahuila ($5\,054\text{ ha}^{-1}\text{ año}$), Durango ($500\text{ ha}^{-1}\text{ año}$) y Chihuahua ($340\text{ ha}^{-1}\text{ año}$) (Ríos *et al.*, 2011). Para contrarrestar lo anterior hay propuestas para establecer plantaciones, sin embargo se corre el riesgo de fracasar, si se hace una mala selección del sitio de residencia final de las plantas (Reséndez *et al.*, 2013). Por ello es necesario determinar lugares donde prevalezcan condiciones climáticas que le sean favorables.

Métodos y Materiales

Para determinar la distribución potencial de *P. laevigata* en tres provincias fisiográficas de la república mexicana (Figura 1) se utilizó el algoritmo BIOCLIM dentro del programa DIVA GIS ver. 7.5 (Higman *et al.*, 2012), que genera un intervalo ecológico para la especie de acuerdo a las variables predictivas, mediante un análisis de la distribución de los registros de presencia sobre cada variable ambiental. Al modelo se le incorporaron ubicaciones como datos de entrada georreferidos obtenidos de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMB), la cual es una red interinstitucional que comparte información biológica y que está constituida por centros de investigación que albergan colecciones científicas de alrededor del mundo. También se le agregaron diversas capas en formato digital de variables climáticas que fueron tomadas de la base de información climática *WorldClim* de los años 1950-2000, con una resolución de 2.5 minutos (Cuadro 1).

As a result of the exploitation to which this species has been subjected through the years due to the large variety of its current and potential uses, this species presents a reduction rate in its surface area in several states of the Mexican Republic, which is particularly notorious in the states of *Coahuila* ($5\,054\text{ ha}^{-1}\text{ year}$), *Durango* ($500\text{ ha}^{-1}\text{ year}$) and *Chihuahua* ($340\text{ ha}^{-1}\text{ year}$) (Ríos *et al.*, 2011). In order to counteract this, proposals are being made to establish plantations of this species, for which there is a risk of failure at the site of final residence of the plants (Reséndez *et al.*, 2013). It is therefore necessary to determine places where favorable climatic conditions prevail.

Materials and Methods

The potential distribution of *P. laevigata* in three physiographic provinces of the Mexican republic (Figure 1) was determined using the BIOCLIM algorithm with the DIVA GIS 7.5 software (Higman *et al.*, 2012), which generate an ecological interval for the species according to the predictive variables, by means of an analysis of the distribution of records of presence for each environmental variable. Locations of the species were included in the model as georeferenced input data obtained from the World Network of Information on Biodiversity (REMB, for its acronym in Spanish), an interinstitutional network sharing biological information and consisting of research centers that host scientific collections around the world. Also added were several layers of climatic variables taken from the WorldClim's climate database for the years 1950-2000, at a 2.5 minute resolution (Table 1).

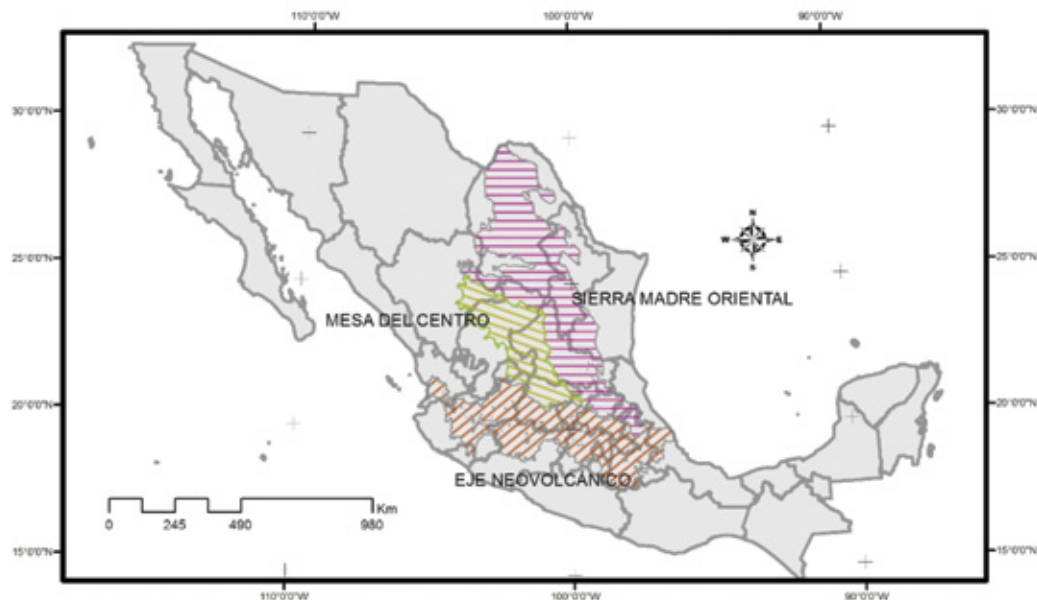


Figura 1. Ubicación de las tres provincias fisiográficas incluidas en el estudio.

Figure 1. Location of the physiographic provinces in Mexico.

Se utilizaron los datos de salida de BIOCLIM clásico y Factor BIOCLIM más limitante para definir la distribución potencial y las variables climáticas más importantes asociadas a *P. laevigata*. Para su validación, se llevó a cabo un análisis del área bajo la curva (AUC) de la función ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y una estimación con el algoritmo Kappa (López y Fernández, 1998).

Estos análisis son pruebas usadas, frecuentemente, en modelos de distribución potencial, cuyas estimaciones muestran la capacidad de discriminación del modelo y que cuanto más cercano el resultado de los mismo sea al valor de uno, el modelo es más acertado y preciso (Anderson, 2003; García, 2008). Los datos de salida fueron mapeados en un archivo ASCII GRID, y con ayuda del programa ArcGis 10 se determinaron cuáles eran los porcentajes de área óptima y la extensión (km²) de las provincias fisiográficas.

The output data of the classic BIOCLIM model and the more limiting BIOCLIM factor were utilized to define the potential distribution and the main climatic variables associated with the species. They were validated by means of an analysis of the area under the Receiver Operating Characteristic curve (ROC AUC) and an estimation using the Kappa algorithm (López and Fernández, 1998).

These analyses are tests frequently used in potential distribution models to show the discrimination capacity of the model; the closer to 1 the results are, the more accurate the model (Anderson, 2003; García, 2008). The output data were mapped in an ASCII GRID file, and the percentages of optimal area and the surface area (km²) of the physiographic provinces were determined using the ArcGis 10 software.

Cuadro 1. Variables bioclimáticas utilizadas en el presente estudio.

Variables bioclimáticas	
Temperatura media anual (°C)	Temperatura media de los tres meses más fríos (°C)
Rango de temperatura media mensual (°C)	Temperatura media de los tres meses más cálidos (°C)
Isothermalidad (°C)	Precipitación anual (mm)
Estacionalidad de la temperatura (°C)	Precipitación del mes más húmedo (mm)
Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	Precipitación del mes más seco (mm)
Temperatura mínima del mes más cálido (°C)	Estacionalidad de la precipitación (mm)
Intervalo de temperatura anual (°C)	Precipitación media de los tres meses más húmedos (mm)
Temperatura media de los tres meses más húmedos (°C)	Precipitación media de los tres meses más secos (mm)
Temperatura media de los tres meses más secos (°C)	Precipitación media de los tres meses más cálidos (mm)
	Precipitación media de los tres meses más fríos (mm)

Table 1. Bioclimatic variables used in the present study.

Bioclimatic variables	
Mean annual temperature (°C)	Mean temperature during the three coldest months (°C)
Mean monthly temperature range (°C)	Mean temperature during the three warmest months (°C)
Isothermality (°C)	Annual precipitation (mm)

Continúa Cuadro 1...

Continúa Cuadro 1...

Bioclimatic variables	
Temperature seasonality (°C)	Precipitation during the most humid month (mm)
Maximum temperature in the warmest month (°C)	Precipitation during the driest month (mm)
Minimum temperature in the warmest month (°C)	Precipitation seasonality (mm)
Annual temperature range (°C)	Mean temperature during the three most humid months (°C)
Mean temperature during the three most humid months (°C)	Mean precipitation during the three driest months (mm)
Mean temperature during the three driest months (°C)	Mean precipitation during the three warmest months (mm)
	Mean precipitation during the three coldest months (mm)

Resultados y Discusión

Prosopis laevigata posee una extensa distribución natural en México (Figura 2). Se le ha identificado en distintos estados, entre los cuales destacan Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí y Veracruz, por reunir la mayoría de los registros de la especie (Figura 3).

Results and Discussion

Prosopis laevigata has a wide natural distribution in Mexico (Figure 2). It has been identified in various states, including Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí and Veracruz, which stand out for having the highest records for this species (Figure 3).

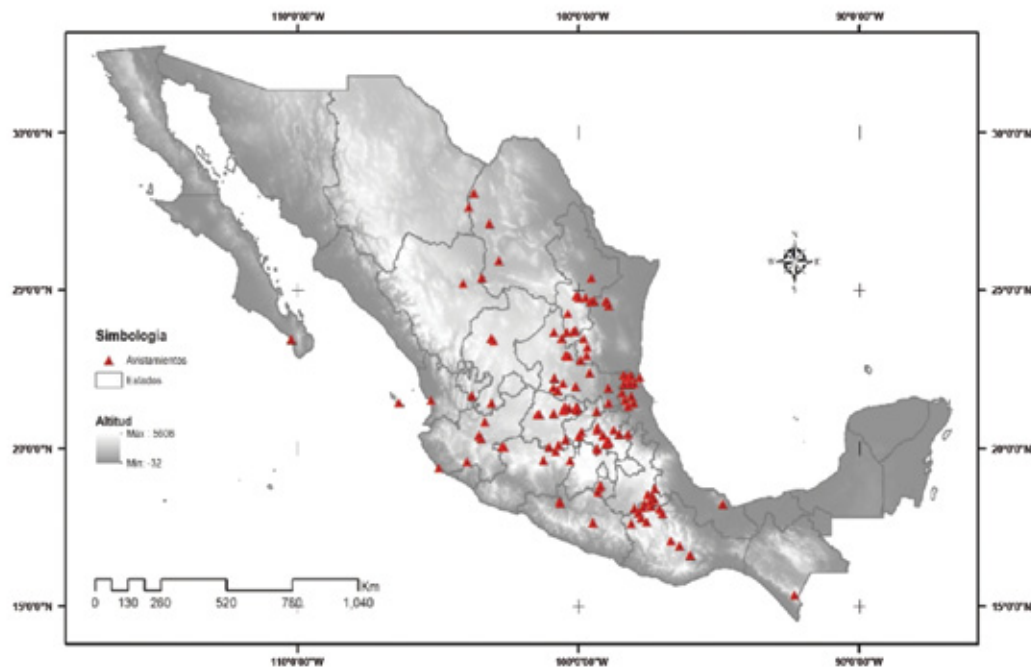


Figura 2. *Prosopis laevigata* (Humb. *et* Bonpl. *ex* Willd) M. C. Johnston en México.
Figure 2. *Prosopis laevigata* (Humb. *et* Bonpl. *ex* Willd) M. C. Johnston in Mexico.

La amplia distribución geográfica de *P. laevigata* indica que es una especie capaz de establecerse en zonas con temperatura y humedad variables, lo cual coincide con lo referido por Rzedowski (1988), quien reconoce la presencia del *Prosopis* en muchas regiones del continente americano, dentro de las zonas áridas y semiáridas en particular (Cuadro 2).

The wide geographical distribution of *P. laevigata* indicates that this species can be established in areas with varying temperature and humidity levels, as referred by Rzedowski (1988), who recognizes the presence of *Prosopis* in many regions of the American continent, particularly in arid and semi-arid zones (Table 2).

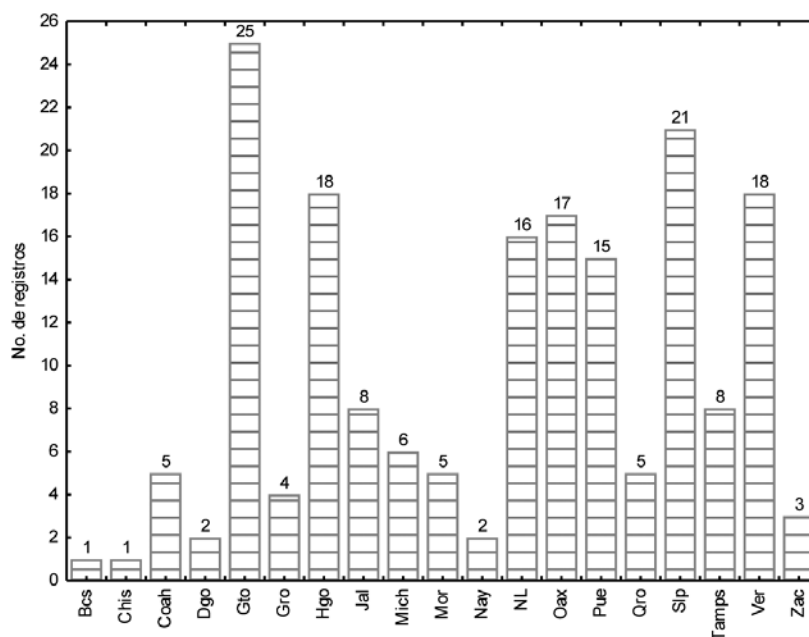


Figura 3. Estados con el mayor número de registros georreferenciados de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston en México.

Figure 3. States with the highest number of georeferenced records for *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston in Mexico.

Cuadro 2. Intervalos bioclimáticos de las zonas en las que se tiene registrada la presencia de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston.

Variable bioclimática	Intervalo	Variable bioclimática	Intervalo
T. anual (°C)	13.4-28.6	T. del cuartil más cálido	9 - 26.5
Intervalo de T. mensual (°C)	8.2 - 19.1	PP anual (°C)	152 - 2067
Isotermalidad (°C)	45.9 - 73.7	PP del mes más húmedo (mm)	38 - 451
Estacionalidad de la T. (°C)	115.1 - 612.3	PP del mes más seco (mm)	0 - 47
T. máxima del mes más cálido (°C)	23.4 - 40	Estacionalidad de PP (mm)	51.4 - 132.9
T. mínima del mes más cálido (°C)	1 - 17.6	PP del cuartil más húmedo (mm)	88- 1225
Intervalo anual de T. (°C)	16.2 - 32	PP de los cuartil más seco (mm)	2 - 147
T. del cuartil más húmedo (°C)	14.6 - 28.9	PP del cuartil más cálido (mm)	87 - 1225
T. del cuartil más seco (°C)	12.3 - 29.2	PP del cuartil más frío (mm)	6 - 233
T. del cuartil más frío (°C)	15.1 - 31.4		

T. = Temperatura; PP = Precipitación pluvial

Table 2. Bioclimatic intervals in the areas in which the presence of *Prosopis laevigata* (Humb. *et* Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston has been recorded.

Bioclimatic variable	Range	Bioclimatic variable	Range
Annual T. (°C)	13.4 - 28.6	T. in the warmest quartile	9 - 26.5
Monthly T. interval (°C)	8.2 - 19.1	Annual PP (mm)	152 - 2067
Isothermality (°C)	45.9 - 73.7	Precipitation during the most humid month (mm)	38 - 451
T. seasonality (°C)	115.1 - 612.3	PP during the driest month (mm)	0 - 47
T _{max} during the warmest month (°C)	23.4 - 40	PP seasonality (mm)	51.4 - 132.9
T _{min} during the warmest month (°C)	1 - 17.6	PP in the most humid quartile (mm)	88 - 1225
Annual T. interval (°C)	16.2 - 32	PP in the driest quartile (mm)	2 - 147
T. in the most humid quartile (°C)	14.6 - 28.9	PP in the warmest quartile (mm)	87 - 1225
T. in the driest quartile (°C)	12.3 - 29.2	PP in the coldest quartile (mm)	6 - 233
T. in the coldest quartile (°C)	15.1 - 31.4		

T. = Temperature; PP = Pluvial precipitation.

El mapa final de distribución potencial del mezquite muestra en color rojo las zonas donde la especie se puede establecer de manera óptima y que se concentran, mayoritariamente, en la región central de México, lo que coincide con los estados con más registros. También existen lugares similares en el occidente del Eje Neovolcánico Transversal, así como al este de la Sierra Madre Oriental (Figura 4).

The final potential distribution map for mesquite shows—in red—the areas where the species can be optimally established; these are concentrated mostly in central Mexico, a region that includes the states with the highest records. Similar locations exist to the west of the Transversal Neovolcanic Axis, as well as to the east of the Eastern *Sierra Madre* (Figure 4).

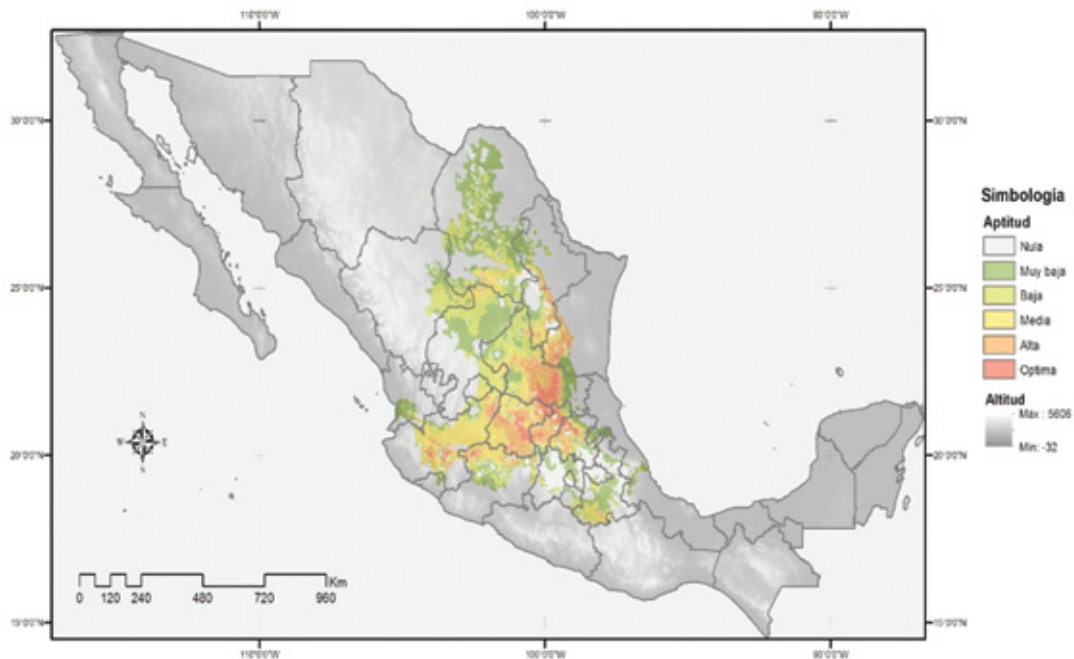


Figura 4. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. *et* Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston en México.
Figure 4. Potential distribution of *Prosopis laevigata* (Humb. *et* Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston in Mexico.

Estos resultados corroboran lo expuesto por Gómez *et al.* (2008) que reconocen las mismas zonas de Nuevo León y Tamaulipas como aptas para *Prosopis laevigata*. De igual modo, se advierten similitudes en la región oriental de Sistema Volcánico Transversal, que consideran de aptitud moderada y en la zona oriental y central como no apta, lo que coincide con los resultados arrojados por el algoritmo BIOCLIM. Sin embargo, existen discrepancias en cuanto a la zona óptima, ya que de acuerdo al modelo de dichos autores, los territorios con esa condición son mucho más reducidos y se ubican en las Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, principalmente. Disparidad que se puede deber a que en dicha investigación se omitieron los puntos de muestreo del centro de México, por lo que con el modelo no se hizo una correcta determinación para el lugar.

Los resultados derivados de BIOCLIM concuerdan con Guevara *et al.* (2008), en cuyo estudio citan que a pesar de que a *P. laevigata* se le identifica como propio de las zonas áridas y semiáridas, consideran que sus afinidades ecológicas no corresponden a una entidad uniforme y que, incluso, pueden ser más específicas que otras especies de matorrales, lo que explica por qué su distribución potencial óptima es tan reducida.

De acuerdo al modelo, 15 % de territorio de las tres provincias fisiográficas posee una buena aptitud para el establecimiento de *P. laevigata* (Figura 5), que equivale a 70 632.08 km² distribuidos principalmente en los estados de Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí y Tamaulipas.

These results confirm the findings of Gómez *et al.* (2008), as they all recognize the same areas of *Nuevo León* and *Tamaulipas* as appropriate for *Prosopis laevigata*. Likewise, similarities are found in the eastern region of the Transversal Volcanic System, considered to be moderately suitable, and in the eastern and central zones, regarded as unsuitable; this coincides with the results obtained using the BIOCLIM algorithm. Nevertheless, there are disagreements as to the optimal zone, as, according to the model of the said authors, the territories with this condition are much more limited and are located mainly in the Eastern *Sierra Madre* and in the Western *Sierra Madre*. This disparity may be due to the fact that the sampling points of central Mexico were omitted from that research, and therefore it was impossible to correctly determine the location based on the model.

The results obtained with BIOCLIM agree with those reported by Guevara *et al.* (2008), according to whom *P. laevigata* is identified as a species that thrives in arid and semi-arid zones; however, its ecological affinities are not a uniform entity and may even be more specific than those of other bush species—a fact that accounts for its limited optimal potential distribution.

According to the model, 15 % of the territory of the three physiographic provinces is suitable for the establishment of this species (Figure 5) and is equivalent to 70 632.08 km², distributed mainly in the states of *Guanajuato*, *Hidalgo*, *Jalisco*, *Michoacán*, *Querétaro*, *San Luis Potosí* and *Tamaulipas*.

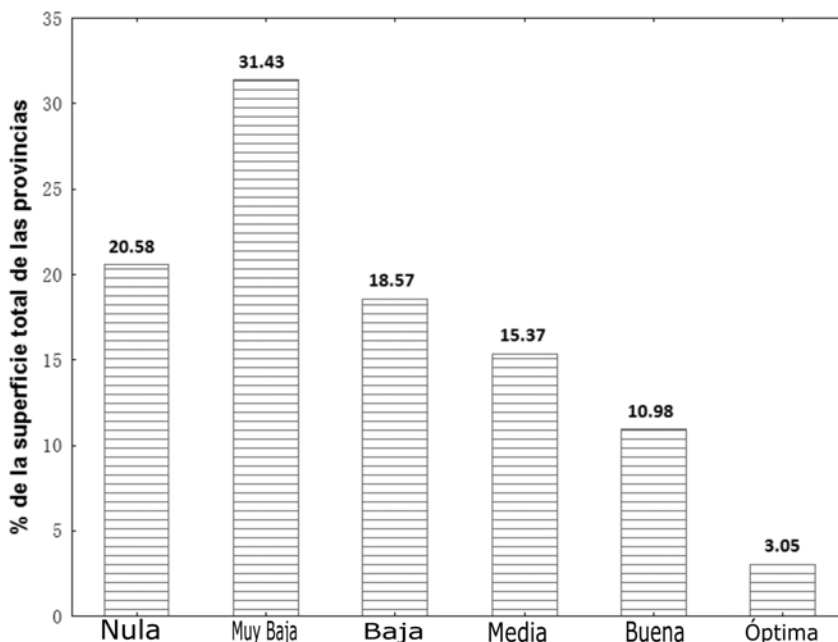
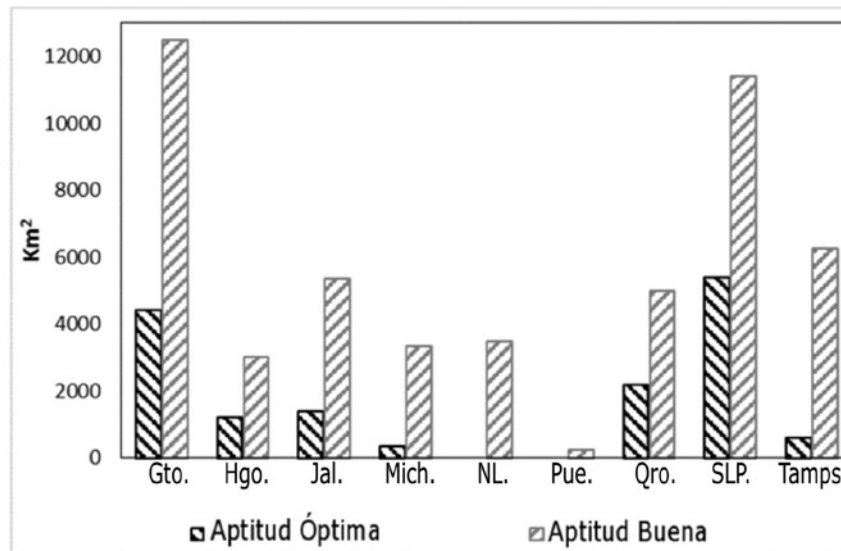


Figura 5. Aptitud estimada para el desarrollo de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston.

Figure 5. Estimated suitability for the development of *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd)

Al comparar la aptitud por entidad federativa, se observa que Nuevo León y Puebla solo poseen una condición buena para la especie y no óptima como sucede con Guanajuato y San Luis Potosí, que tienen la mayor extensión con los requerimientos bioclimáticos del mezquite; esto concuerda con lo observado al comparar los registros georeferenciados de la REMIB (Figura 6).

When comparing the degrees of suitability by state, we observe that *Nuevo León* and *Puebla* possess only one good condition for the species; yet, this is not optimal as in the case of *Guanajuato* and *San Luis Potosí*, which have the largest surface area with the bioclimatic requirements of mesquite; this agrees with the results of comparing the georeferenced records of REMIB (Figure 6).



Gto. = Guanajuato; Hgo. = Hidalgo; Jal. = Jalisco; Mich. = Michoacán; NL. = Nuevo León; Pue. = Puebla; Qro. = Querétaro; SLP. = San Luis Potosí; Tamps. = Tamaulipas.

Figura 6. Extensión con aptitud buena y óptima en km² para el establecimiento de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston.

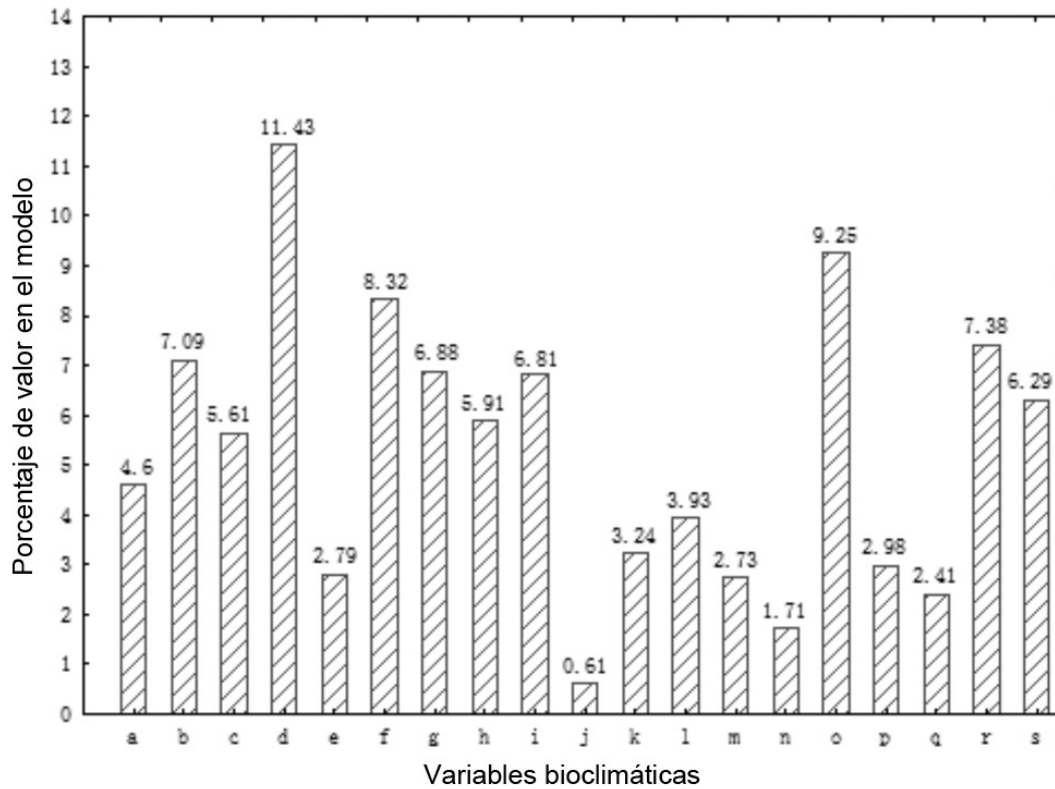
Figure 6. Surface area, in km², with good and optimal suitability for the establishment of *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston.

De acuerdo al modelo, los factores que inciden sobre el establecimiento de la especie fueron la estacionalidad de la temperatura (11.43 %) y de la precipitación (9.25 %), lo que supone que *P. laevigata* es afectada, principalmente, por las diferencias mensuales de dichas variables (Figura 7); los resultados coinciden con los de Ávila *et al.* (2014) para taxa de amplia distribución que confirman tal supuesto.

According to the model, the factors that had an impact on the establishment of the species were temperature and precipitation seasonality (11.43 % and 9.25 %, respectively), which implies that *P. laevigata* is mainly affected by the monthly differences in these variables (Figure 7); these results agree with the findings of Ávila *et al.* (2014) for wide distribution species, which confirm this assumption.

El análisis del área bajo la curva de la función ROC y el estimador Kappa arrojaron resultados de 0.973 y 0.915, por lo que se infiere que el modelo posee una excelente capacidad de predicción, ya que si el resultado de ambos estimadores se acerca más al valor de uno, el modelo tendrá una mayor probabilidad de exactitud, y, por lo tanto, de acertar en las áreas predichas (Figura 8), lo que implica que tiene un desempeño excelente. Dicho comportamiento lo corroboran Ávila *et al.* (2014) y Contreras *et al.* (2010), en cuyos trabajos registraron valores AUC de 0.997 y 0.971 para *Taxus globosa* Schldl. y *Pinus herrerae* Martínez, respectivamente, en ambos casos los autores concluyeron haber logrado resultados precisos.

The analysis of the area under the ROC curve and using the Kappa estimator yielded results of 0.973 and 0.915. Consequently, it is inferred that the model has an excellent predictive capacity, for if the result for both estimators is closer to 1, the model will have a higher probability of accuracy, and therefore give better predictions for the areas (Figure 8)—an indication of its excellent performance. This behavior has been verified by Ávila *et al.* (2014) and Contreras *et al.* (2010), who registered AUC values of 0.997 and 0.971 for *Taxus globosa* Schldl. and *Pinus herrerae* Martínez, respectively; in both cases, the authors concluded that they had obtained accurate results.



a = Temperatura anual; b = Intervalo de temperatura mensual; c = Isothermalidad; d = Estacionalidad de la temperatura; e = Temperatura máxima del mes más cálido; f = Temperatura mínima del mes más cálido; g = Intervalo anual de temperatura; h = Temperatura del cuartil más húmedo; i = Temperatura del cuartil más seco; j = Temperatura del cuartil más frío; k = Temperatura del cuartil más cálido; l = Precipitación pluvial anual; m = Precipitación pluvial del mes más húmedo; n = Precipitación pluvial del mes más seco; o = Estacionalidad de precipitación pluvial; p = Precipitación pluvial del cuartil más húmedo; q = Precipitación pluvial del cuartil más seco; r = Precipitación pluvial del cuartil más cálido; s = Precipitación pluvial del cuartil más frío.

a = Annual temperature; b = Monthly temperature interval; c = Isothermality; d = Temperature seasonality; e = Maximum temperature during the warmest month; f = Minimal temperature during the warmest month; g = Annual temperature interval; h = Temperature in the most humid quartile; i = Temperature in the driest quartile; j = Temperature in the coldest quartile; k = Temperature in the warmest quartile; l = Annual pluvial precipitation; m = Pluvial precipitation during the most humid month; n = Pluvial precipitation during the driest month; o = Pluvial precipitation seasonality; p = Pluvial precipitation in the most humid quartile; q = Pluvial precipitation in the driest quartile; r = Pluvial precipitation in the warmest quartile; s = Pluvial precipitation in the coldest quartile.

Figura 7. Factores más limitantes en el modelo de nicho ecológico.

Figure 7. The most limiting factors in the ecological niche model.



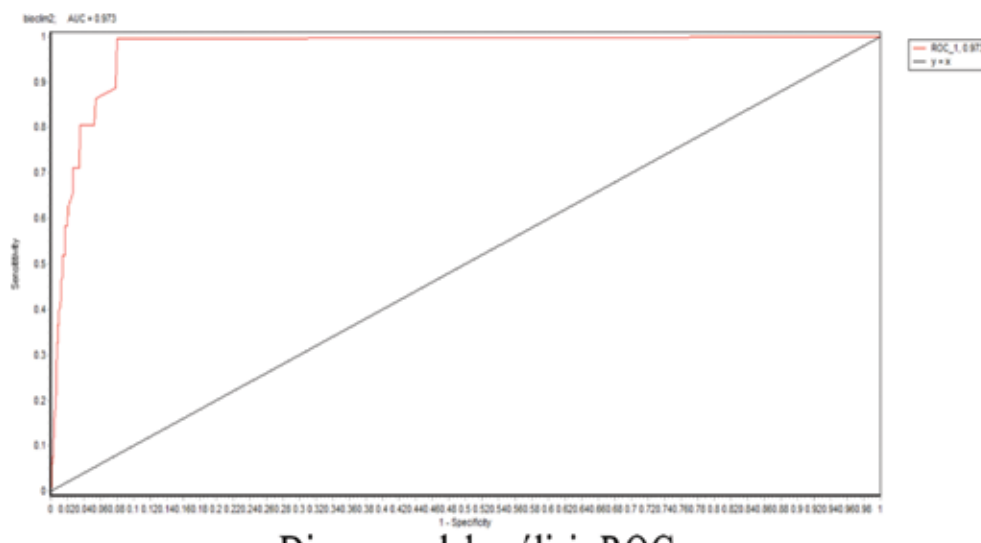


Diagrama del análisis ROC

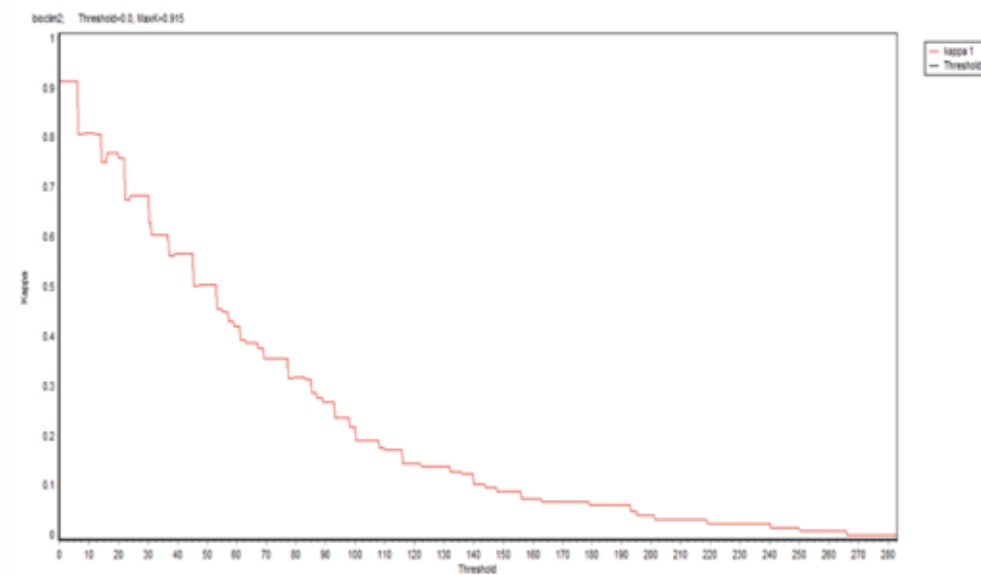


Diagrama del estimador Kappa

Figura 8. Resultados del análisis del área bajo la curva de la función ROC y el estimador Kappa.
Figure 8. Results of the analysis of the area under the ROC curve and with the Kappa estimator.

Conclusiones

La región del Eje Neovolcánico Transversal, el Altiplano Sur y la Sierra Madre Oriental reúnen un área de 70 632.08 km² en la que la estacionalidad de temperatura y lluvia serían los factores más limitantes (11.43 % y 9.25 %, respectivamente) para el crecimiento óptimo de *Prosopis laevigata*.

Conclusions

The Transversal Neovolcanic Axis region, the Southern High Plateau and the Eastern *Sierra Madre* all cover a surface area of 70 632.08 km², in which the temperature and pluvial precipitation seasonality are the most limiting factors (11.43 % and 9.25 %, respectively) for the optimal development of *Prosopis laevigata*.



Este tipo de estudios permite definir mejores parámetros para el desarrollo de planes de manejo y plantaciones de *P. laevigata*, ya que ayudan a determinar las zonas potenciales para el establecimiento de especies, con lo que es factible garantizar un alto porcentaje de supervivencia. 🌱

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Abraham Palacios Romero: concepción y planteamiento de la investigación, desarrollo experimental y análisis de resultados; María de la Luz Hernández Flores: concepción y planteamiento de la investigación, desarrollo experimental, y elaboración de mapas; Rodrigo Rodríguez Laguna: análisis de resultados y revisión del manuscrito; Edith Jiménez Muñoz: redacción del manuscrito; David Tirado Torres: revisión del manuscrito.

Referencias

- Anderson, R. P., D. Lew and P. Townsend. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162 (3): 211-232.
- Austin, M. P. 2007. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling* 200 (1-2): 1-19.
- Ávila, R., R. Villavicencio y J. A. Ruíz. 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5 (24): 92-109.
- Contreras, M. R., V. I. Luna y M. C. A. Ríos. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 421-433.
- Cortesi, A. 2002. La pérdida de biodiversidad en nuestro mundo. In: Conferencia Anual de la The World Future Society. Philadelphia, PA, USA. 8 p.
- Villanueva D., J. R. J. Ibarra, E. H. Cornejo O. y C. Potisenek T. 2004. El mezquite en la Comarca Lagunera. Su dinámica, volumen maderable y tasas de crecimiento anual. *Agrofaz* 4 (2): 633-648.
- Finch, J. M., M. J. Samways, T. R. Hill, S. E. Piper and S. Taylor. 2006. Application of predictive distribution modelling to invertebrates: Odonata in South Africa. *Biodiversity and Conservation* 15 (13): 4239-4251.
- García M., M. R. 2008. Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y optimización de métodos de modelado ecológico. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal I. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España. 186 p.
- Gómez D., J. D., A. I. Monterroso R., J. A. Tinoco R. y M. L. Toledo M. 2008. Impactos del cambio climático en el sector forestal a nivel país. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F., México. 93 p.
- Guevara E., A., E. González S., H. Suzán A., G. Malda B., M. Martínez D., M. Gómez S., I. Hernández S., Y. Pantoja H. y D. Olvera V. 2008. Distribución potencial de algunas leguminosas arbustivas en el altiplano central de México. *Agrociencia* 42 (6): 703-716.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15): 1965-1978. DOI: 10.1002/joc.1276.
- Hijmans, R. J., L. Guarino and P. Mathur. 2012. DIVA-GIS Version 7.5 Manual. 71 p. http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS_manual_7.pdf (12 de julio de 2013).
- López, A. 2012. Deforestación en México: un análisis preliminar. Centro de Investigación y Docencia Económicas A. C. México, D. F., México. 40 p.

This type of studies allows the definition of better parameters for the development of management plans and plantations of this species, as it helps to identify the potential areas for the establishment of the species, and thus, to ensure a high survival rate. 🌱

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Contribution by author

Abraham Palacios Romero: research conception and approach, experimental development and results analysis; María de la Luz Hernández Flores: research conception and approach, experimental development and mapping; Rodrigo Rodríguez Laguna: results analysis and revision of the manuscript; Edith Jiménez Muñoz: drafting of the manuscript; David Tirado Torres: revision of the manuscript.

End of the English version

- López de U., G. I. y P. Fernández S. 1998. Curvas ROC. Cuadernos de Atención Primaria 5 (4): 229-235.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2011. Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia. 716 p.
- Plamen, G., M. and I. L. Stoyanov. 2005. Ecological profiles of harvestmen (Arachnida, Opiliones) from Vitosha Mountain (Bulgaria): a mixed modelling approach using gams. *Journal of Arachnology* 33 (2): 256-268.
- Reséndez V., K. L., M. P. González C., I. Chairez H. y O. Díaz M. 2013. Aspectos biológicos, ecológicos y usos del mezquite. *Vid supra, Visión Científica* 5 (1): 35-38.
- Ríos S., J. C., R. Tracios C., L. M. Valenzuela N., G. Sosa P. y R. Rosales S. 2011. Importancia de las poblaciones de mezquite en el norte-centro de México. CENID-RASPA. Durango, Dgo., México. 220 p.
- Rodríguez S., E. N., G. E. Rojo M., B. Ramírez V., R. Martínez R., M. de la C. Conga H., S. M. Medina T., H. H. Piña R. 2014. Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai* 10 (3): 173-193.
- Rzedowski, J. 1988. Análisis de la distribución geográfica del complejo *Prosopis* (Leguminosae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Botánica Mexicana* 3: 7-19.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2004. Anexos de la Evaluación del Programa Nacional de Reforestación Pronare 2003. Semarnat. México, D. F., México. 42 p.
- Soberón, J. and M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Washington, DC, USA. Num. 106. pp. 19644-19650.
- Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 2010. Informe de evaluación externa de los apoyos de reforestación ejercicio fiscal 2009. Conafor. México, D. F., México. 140 p.
- Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). 2009a. Reforestación: evaluación externa ejercicio fiscal 2008, Informe de Entidades Federativas, Resultados, Aciertos y Áreas de Oportunidad. Conafor. México, D. F., México. 388 p.
- Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). 2009b. Reforestación: evaluación externa ejercicio fiscal 2008, Informe de Entidades Federativas, Resultados, Aciertos y Áreas de Oportunidad. 2008. Conafor. México, D. F., México. 197 p.