



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.670>

Artículo

Descriptores ecológicos y efecto del cambio climático en la aptitud ambiental de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

Ecological descriptors and effects of climate change on the environmental aptitude of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

Noé Durán Puga¹, José Ariel Ruiz Corral¹, Diego Raymundo González Eguiarte^{1*} y José Ángel Martínez Sifuentes¹

Abstract

The objective of the study was to estimate the potential alterations in the areas with environmental aptitude (AA) and to establish the ecological descriptors for *L. leucocephala*; with the MaxEnt model and based on 19 bioclimatic variables and one edaphic, the distribution niche was modeled for the periods 1960-1990, 2041-2060 and 2061-2080. The climatic data were obtained from the Global Climate Data portal of WorldClim and worked with raster and ascii images with a resolution of 30 seconds of arc. For future climatologist, the general circulation model (MCG) was considered: GFDL-CM3 with two representative greenhouse gas concentration trajectories (RCP 4.5 and RCP 8.5). The results showed that for the reference climate (1960-1990), the area with AA for the species is 251 134 Km², and it is located in the coastal areas of the Gulf of Mexico, *Sierra Madre Oriental, Occidental and del Sur, Sierra Norte of Puebla, Isthmus of Tehuantepec* and part of the *Yucatán Peninsula*, and the environmental variables that contribute most to explain the distribution of the species are: photoperiod, precipitation of the wettest month, average temperature of the coldest month, accumulated precipitation from May to October and the average temperature from November to April. Regarding future climate scenarios, the projections are for a substantial increase in the area with AA, the 51 to 72 % for the RCP 8.5 and 4.5, respectively. Regarding the ecological descriptors of *L. leucocephala*, the environmental distribution ranges are wide, both for variables related to temperature and variables related to precipitation.

Keywords: Climatic scenarios, climatic ranges, *Huaje*, MaxEnt, distribution niches, RCP.

Resumen

El objetivo del estudio fue estimar las áreas con aptitud ambiental (AA) y establecer los descriptores ecológicos para *Leucaena leucocephala*, con el software *MaxEnt* con base en 19 variables bioclimáticas y una edáfica; se modeló el nicho de distribución para los períodos 1960-1990, 2041-2060 y 2061-2080. Los datos climáticos se obtuvieron del portal de *Global Climate Data de WorldClim* y se procesaron mediante imágenes ráster y *ascii* con una resolución de 30 segundos de arco. Para las climatologías futuras se consideró el modelo de circulación general (MCG): GFDL-CM3 con dos trayectorias representativas de concentración de gases efecto invernadero (rcp 4.5 y rcp 8.5). Los resultados mostraron que para el periodo 1960-1990, la superficie con AA para la especie fue de 251 134 km², y se ubica en las zonas costeras del Golfo de México, *Sierra Madre Oriental, Occidental y del Sur, Sierra Norte de Puebla, Istmo de Tehuantepec* y parte de la *Península de Yucatán*; las variables ambientales que más contribuyeron a explicar la distribución de *L. leucocephala* fueron el fotoperiodo, la precipitación del mes más húmedo, temperatura media del mes más frío, precipitación acumulada de mayo a octubre y la temperatura media de noviembre a abril. Respecto a los escenarios futuros, las proyecciones auguran un incremento en la superficie con AA, de 51 a 72 % para los rcp 8.5 y 4.5, respectivamente. En lo referente a los descriptores ecológicos, los intervalos ambientales de distribución son amplios, tanto para las variables de temperatura como de precipitación.

Palabras clave: Escenarios climáticos, intervalos climáticos, *huaje*, *MaxEnt*, nichos de distribución, rcp.

Fecha de recepción/Reception date: 2 de octubre de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de marzo de 2020

¹Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: diegonz@cucba.udg.mx

Introducción

El clima del mundo está cambiando a un ritmo sin precedentes y continuará en las siguientes décadas más rápido e intenso que lo predicho, y la influencia antrópica en este proceso es clara (IPCC, 2014). Existen numerosas evidencias de que el cambio climático tiene consecuencias ecológicas (Parmesan, 2006; Visser, 2008). La predicción de la respuesta de la diversidad biológica al cambio climático se ha convertido en un campo muy activo de la investigación científica (Beaumont *et al.*, 2011; McMahon *et al.*, 2011); esta respuesta juega un papel importante en alertar a científicos y tomadores de decisiones de los posibles riesgos futuros, proporciona un medio para reforzar la atribución de las modificaciones en el ecosistema y contribuyen al desarrollo de estrategias proactivas para reducir los impactos (Parmesan *et al.*, 2011).

Se prevé que los múltiples componentes del cambio climático afectarán a todos los niveles de la biodiversidad, desde los organismos hasta las áreas bióticas (Parmesan, 2006); en los niveles más básicos, es capaz de disminuir la diversidad genética de las poblaciones debido a la selección direccional y a una rápida migración; lo que podría, a su vez, afectar el funcionamiento y la resiliencia del ecosistema (Lasco *et al.*, 2008; Schneider *et al.*, 2009), que conlleva a transformar la red de interacciones a nivel comunitario (Bellard *et al.*, 2012).

Las modificaciones en el clima afectan la distribución de las especies, quienes pueden mostrar contracciones importantes en su hábitat disponible y alcanzable, e incluso algunas se extinguen (Parmesan, 2006). Ciertos modelos climáticos han demostrado ser particularmente útiles para comprender el alcance de la distribución y el impacto del cambio climático en taxones amenazados. *MaxEnt* es uno de ellos, tiene el potencial para predecir la pérdida de la biodiversidad en escenarios futuros (Bertrand *et al.*, 2012), también ha mejorado significativamente la predicción de la distribución y hábitat adecuado de las especies afectadas por el cambio climático (Hu *et al.*, 2015; Carvalho *et al.*, 2017).

México es uno de los países con mayor diversidad biológica, por su gran complejidad fisiográfica y por su intrincada historia tanto geológica, como climática. Se estima que 12 % de la biodiversidad mundial se localiza en el territorio nacional, de esta 12 % de los géneros y de 50 - 60 % de las especies de plantas son endémicas (Sarukhán *et al.*, 2009). Esa riqueza comprende taxa con uso potencial o actual para la agricultura y la ganadería, como es el caso de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, taxon que se distribuye en los trópicos, por todo México y América Central; se produce de forma natural en la Península de Yucatán y en el Istmo de Tehuantepec, en el sur de México (Cook *et al.*, 2005, Loya *et al.*, 2014). Se ha extendido en una amplia gama de sitios, un tanto libres de heladas, también está presente en muchas zonas semiáridas, siempre que exista algo de humedad en el suelo (Heuzé y Tran, 2015). Posee una alta calidad nutricional de alimento para los bovinos, los ovinos y los caprinos, su biomasa aérea es rica en nutrientes, es tolerante a la sequía, además de fijar nitrógeno (N) atmosférico al suelo y controlar la erosión; su sombra atenúa la intensidad lumínica y reduce el efecto de las altas temperaturas tropicales, además favorece la vida silvestre, incrementándose así la biodiversidad (Bacab *et al.*, 2013); se usa como alimento y medicina, su madera sirve para la construcción y para elaborar utensilios; las hojas, flores y semillas se comen frescas, crudas o cocinadas (Zárate, 1999; Heuzé y Tran, 2015).

Con el cambio climático, la diversidad de climas de México se puede alterar (Lasco *et al.*, 2008; Schneider *et al.*, 2009), al igual que la riqueza y distribución de especies, entre ellas la de interés para el presente estudio. Por ello, es necesario evaluar, entre otros aspectos, el efecto que tendrá el cambio climático sobre las áreas con aptitud ambiental para el desarrollo de los taxones, y con dicha información proyectar posibles medidas de adaptación o mitigación encaminadas a minimizar el impacto del cambio climático sobre los recursos naturales. Por tal motivo, los objetivos del presente estudio fueron obtener los descriptorios ecológicos de *L. leucocephala* y estimar las alteraciones potenciales del cambio climático en las áreas con aptitud ambiental para su distribución en los periodos 2041-2060 y 2061-2080 en México.

Materiales y Métodos

Bases de datos biológicos

Se consideraron los datos de 1 138 sitios de muestreo georreferenciados, correspondientes a la base de datos del Inventario Nacional Forestal y Suelos (INFyS) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor) (Conafor, 2016).

Bases de datos y sistema de información geográfica

Se utilizaron imágenes ráster de precipitación y temperatura de los periodos 1960-1990 (climatología de referencia), 2041-2060 y 2061-2080, los cuales se obtuvieron del portal de *Global Climate Data* de WorldClim (2017); y se trabajaron mediante imágenes ráster y *ascii*, con una resolución de 30 segundos de arco, además se utilizó el ráster de textura de suelos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (Inegi, 2009); para las climatologías 2041-2060 y 2061-2080 se consideró el MCG: GFDL-CM3, bajo los rcp 4.5 y rcp 8.5 que forma parte de la modelación del clima desarrollado por el proyecto de intercomparación de modelos acoplados Fase 5 (CMIP5) (Walton *et al.*, 2013). Los rcp se refieren a la radiación global de energía expresada en W/m^2 y asumen que esta varía al incrementarse los gases efecto invernadero (GEI).

A partir de las variables climáticas básicas antes mencionadas se derivó una serie de variables adicionales para realizar el análisis *MaxEnt* de nichos potenciales de distribución, bajo condiciones de la climatología 1960-1990, como para las climatologías 2041-2060 y 2061-2080. Las variables utilizadas fueron: temperatura máxima media anual, temperatura máxima de mayo a octubre, temperatura máxima de noviembre a abril, temperatura media anual, temperatura media de mayo a octubre, temperatura media de noviembre a abril, temperatura media del mes más cálido, temperatura media del mes más frío, temperatura mínima media anual, temperatura mínima de mayo a octubre, temperatura mínima de noviembre a abril, precipitación acumulada anual, precipitación acumulada de mayo a octubre,

precipitación acumulada de noviembre a abril, precipitación del mes más seco, precipitación del mes más húmedo, oscilación térmica anual, fotoperiodo promedio de mayo a octubre y textura del suelo (tex).

La implementación de esos parámetros y la generación de sus respectivas imágenes ráster, se hizo con el sistema Idrisi Selva (Eastman, 2012). Las variables empleadas son las que, normalmente, se han utilizado para la potencialidad territorial de especies vegetales (Costa *et al.*, 2010; Moreno *et al.*, 2011).

Modelo de nicho ecológico

Se aplicó el enfoque de Máxima Entropía (*MaxEnt*) para modelar el nicho ecológico y predecir la distribución actual y futura del taxon, en su versión de escritorio 3.4.1 (Steven *et al.*, 2017). El modelo *MaxEnt* establece predicciones de distribución de especies a partir de información de los datos de presencia (Phillips *et al.*, 2006) y con base en las condiciones ambientales más significativas (Moreno *et al.*, 2011). Los píxeles donde se tiene certeza de que se encuentra la especie en estudio constituyen los puntos de muestreo y las características son las variables climáticas, edáficas y otras funciones de las mismas. La finalidad del modelo es predecir la idoneidad del medio ambiente para los taxa en función de las variables ambientales (Phillips *et al.*, 2006).

A partir de las coberturas de los parámetros y los datos de presencia de la especie, se modelaron los nichos de distribución para los períodos 1960-1990, 2041-2060 y 2061-2080; para ello se usaron 75 % de los registros de presencia como puntos de entrenamiento y 25 % como puntos de validación, 50 réplicas y 500 iteraciones (Sánchez *et al.*, 2018). Se utilizó el índice AUC (área bajo la curva) para evaluar el modelo estadístico, ya que este índice es de los más utilizados para medir la calidad de los modelos (Moreno *et al.*, 2011). La complejidad del modelo se controla con la elección de las variables; además, *MaxEnt* presenta, dentro de su configuración, un operador

denominado “regularización de parámetros” que permite evitar la sobreposición de variables, lo que evita su efecto perjudicial sobre la predicción (Phillips y Dudík, 2008).

Los valores de los puntos obtenidos representan valores de idoneidad relativa para la presencia de las especies, y constituyen la base de un modelo de distribución potencial. Las imágenes resultantes de la modelación *MaxEnt* de nichos de distribución se recuperaron en el sistema *ArcGis* (ESRI, 2010) y se editaron en el formato de mapas.

Ajuste del modelo

Maxent predice por medio del modelo de nicho ecológico la tasa de ocurrencia relativa (curva ROC) de la especie, como una función de los predictores ambientales en cada localidad (Merow *et al.*, 2013); a su vez, el área bajo la curva (AUC) se interpreta como el ajuste del modelo, en el que un valor de 1.0 sería un clasificador perfecto y uno aleatorio tendría un valor de 0.5 (Phillips *et al.*, 2006), por lo que aquéllos cercanos a 1.0 muestran mayor ajuste del modelo a los datos.

Los resultados de *Maxent* incluyen imágenes con áreas de distribución potencial de la especie, donde cada celda tiene un valor de predicción; por otra parte, en un gran número de investigaciones se requiere fijar un valor umbral para estimar las áreas con aptitud ambiental para cada taxón (Liu *et al.*, 2016), para lo cual el modelo *Maxent* integra un archivo con los diferentes valores umbrales usados con mayor frecuencia. En el presente estudio se utilizó como umbral logístico el valor 10 acumulativo fijo (*Fixed cumulative value 10*).



Resultados y Discusión

Modelo del nicho de distribución potencial

Los resultados de la aplicación de la técnica *Receiver Operating Characteristic* (ROC) indicaron que el modelo es adecuado, ya que el valor del área bajo la curva del escenario actual fue de 0.948 para los datos de entrenamiento (línea roja), y para los escenarios futuros fue superior a 0.95 (Figura 1). Lo que indica que el modelo para clasificar la presencia de *L. leucocephala* fue satisfactorio (Parolo *et al.*, 2008).

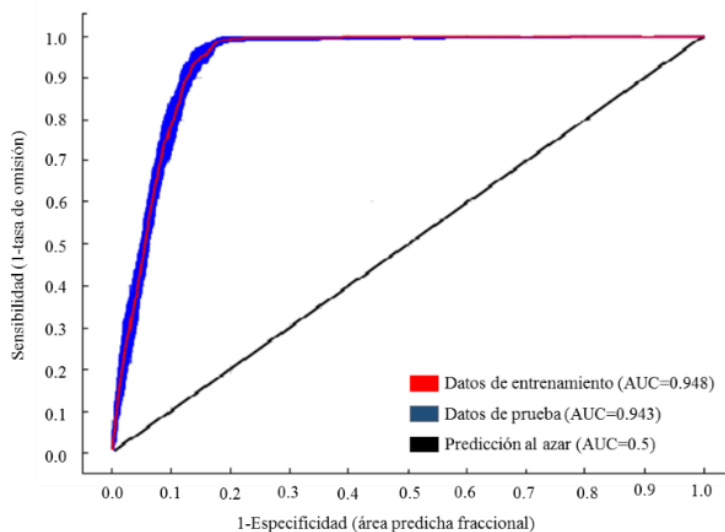


Figura 1. Curva operacional o curva ROC para *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Por lo general, se considera que un valor de AUC mayor a 0.7 tiene un buen ajuste (Hanley y McNeil, 1982; Elith, 2006). Las variables ambientales que contribuyeron en 74 % a explicar la distribución de la especie fueron: el fotoperiodo, la precipitación del mes más húmedo, temperatura media del mes más frío, precipitación acumulada de mayo a octubre y la temperatura media de noviembre a abril.

Descriptores ecológicos

En el Cuadro 1, se resumen los parámetros de los descriptores ecológicos de las variables ambientales que, en mayor medida, contribuyeron a explicar la distribución de *L. leucocephala*. Se observa que los intervalos ambientales de distribución resultaron amplios, tanto para las variables relacionadas con la temperatura como para las de precipitación. Este hecho evidencia una amplia rusticidad de la especie, característica que podría ser favorable en ambientes donde el cambio climático se manifieste de manera más agresiva (Heuzé y Tran, 2015).

Cuadro 1. Descriptores ecológicos de las variables ambientales que contribuyen en 74 % a la distribución geográfica de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en México.

Variables	<i>Leucaena leucocephala</i>		
	Mín	Máx.	% C
Fotoperiodo noviembre-abril (h)	11.2	11.6	28.8
Precipitación del mes más húmedo (mm)	60	640	24.8
Temperatura media del mes más frío (°C)	11	28	11.1
Precipitación acumulada de mayo a octubre (mm)	297	3 157	4.7
Temperatura media de noviembre a abril (°C)	14.2	28.5	4.4

Mín = Valor mínimo; Máx = Valor máximo; % C = Porcentaje de contribución.

Con base en la información del Cuadro 1, *L. leucocephala* se distribuye en regiones donde el fotoperiodo de la temporada noviembre-abril se ubica entre 11.2 y 11.6 horas; condición que coincide con lo consignado por Heuzé y Tran (2015), quien

señala que es una especie de día corto, cuya floración y reproducción se estimula con un fotoperiodo inferior a 12 horas. Sin embargo, Whitesell y Parrotta (2008) indica al respecto que las variedades comunes de *L. leucocephala* florecen todo el año. Otra variable de importancia es la temperatura media del mes más frío, misma que se distribuye en sitios con un valor de 11 a 28 °C, condición que corresponde a zonas desde templadas a muy cálidas (Medina *et al.*, 1998); por lo que, la temperatura parece no ser un factor tan restrictivo para su distribución.

Otra variable importante fue la precipitación del mes más húmedo; en el Cuadro 1 se muestra que *L. leucocephala* se desarrolla en lugares con valores entre 60 y 640 mm, los cuales existen en zonas de semiáridas a húmedas y que corresponden a valores de humedad relativa de bajos a altos en el mes más húmedo del año. Lo anterior coincide con lo señalado por Petit *et al.* (2010), quienes refieren que *L. leucocephala* se distribuye en forma natural en áreas donde la humedad relativa en el mes de septiembre (por lo general, el mes más húmedo) se registra hasta con 85 %.

Áreas con aptitud ambiental de *Leucaena leucocephala*

La aptitud ambiental durante el periodo 1960-1990 (Figura 2), se apreció favorable para la especie bajo estudio como resultado de sus amplios intervalos ambientales (Heuzé y Tran, 2015). La superficie con aptitud ambiental fue notoria en gran parte del centro y sur de México, lo que demuestra que las condiciones tropicales y subtropicales corresponden mejor a las necesidades climáticas de la especie (Zárate, 1999; Heuzé y Tran, 2015).





Figura 2. Áreas con aptitud ambiental para *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en el periodo 1960-1990.

La mayor presencia de las poblaciones se concentró en la Sierra Madre del Sur, en las llanuras costeras del Golfo de México y, en gran proporción, en la Península de Yucatán; esa presencia está en correspondencia con lo documentado, en el sentido de que *L. leucocephala* crece en gran variedad de ambientes, ya que posee una amplia gama de adaptación climática (Loya *et al.*, 2014).

En la Figura 2, se observa que la superficie con aptitud ambiental abarca una extensión de 251 134 km², ubicada principalmente en las zonas costeras del Golfo de México, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, Sierra Norte de Puebla, Istmo de Tehuantepec y gran parte de la Península de Yucatán. Información que coincide con lo registrado por Loya *et al.* (2014) y Heuzé y Tran (2015), quienes señalan que esta leguminosa tiene una amplia distribución en México y se propaga en climas tropicales y subtropicales con altitudes que varían desde el nivel del mar hasta los 1 500 m. Este intervalo altitudinal de la especie podría ampliarse debido a la presión del incremento en la temperatura de los periodos estudiados, por lo que *L. leucocephala* migrará hacia altitudes mayores.

Aptitud ambiental para *Leucaena Leucocephala* en los escenarios de cambio climático

La delimitación de áreas para la especie y su dinámica territorial, en función de los cambios climáticos, determinan en qué sentido impactarán sobre el incremento, disminución o mantenimiento de las áreas de distribución.

En los mapas de la Figura 3, se muestra la dinámica territorial que tendrán las áreas con aptitud ambiental para *L. leucocephala*; al respecto, la predicción del MCG augura una dispersión favorable de la superficie en los dos periodos climáticos y en las dos rutas representativas de concentración de GEI (Cuadro 2); aunque se acentúa con el rcp 4.5 para ambos periodos. Referente al periodo 2041-2060, el área con aptitud ambiental se incrementará 72 %, y para el escenario 2061-2080 de 61 % (Figura 4); lo cual concuerda con lo señalado por Guitérrez y Trejo (2014) quienes registran que el efecto del cambio climático sobre los ecosistemas se reflejará en la alteración de la distribución y abundancia de las especies, o en la desaparición directa de algunos taxa y de poblaciones.



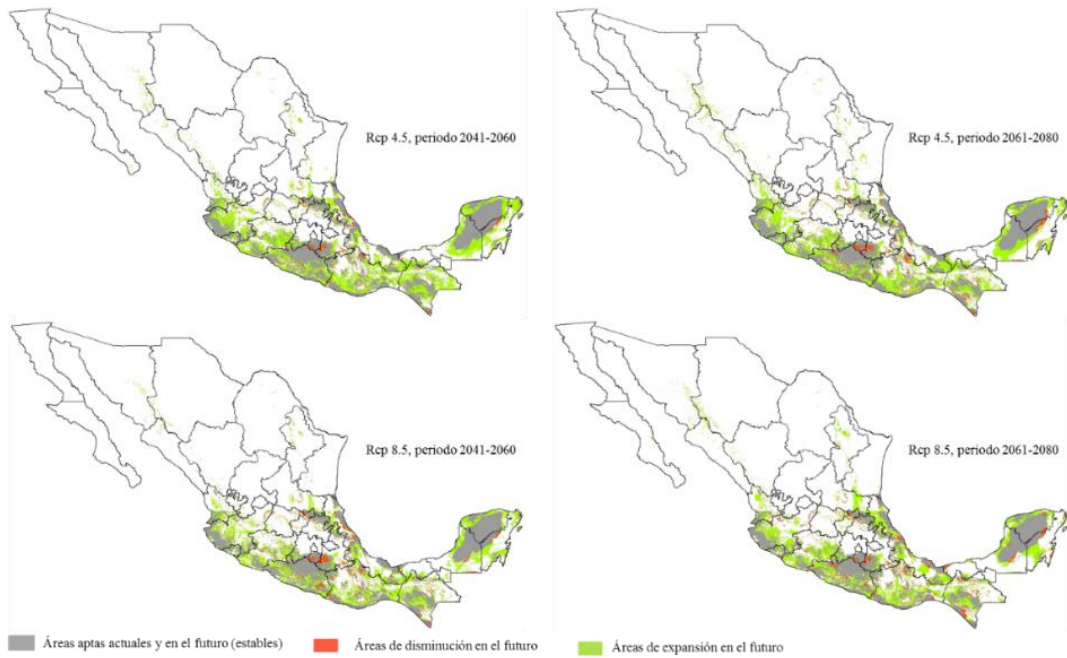


Figura 3. Áreas con aptitud ambiental para dos periodos de tiempo y dos rcp con el MCG GFDL-CM3 para *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Cuadro 2. Áreas (km²) con aptitud ambiental para *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit con el MCG GFDL-CM3, y dos trayectorias representativas de concentración de gases efecto invernadero (rcp 4.5, rcp 8.5) en México.

Periodos	2041-2060		2061-2080	
	Rcp 4.5	Rcp 8.5	Rcp 4.5	Rcp 8.5
Áreas con AA	434 173	380 927	406 115	383 965

AA = Aptitud ambiental



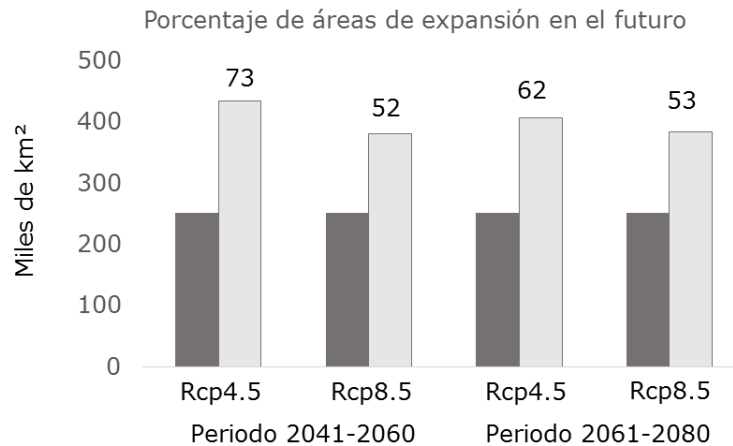


Figura 4. Porcentaje de expansión de áreas con aptitud ambiental (color gris oscuro), respecto al clima de referencia, en los periodos 2041-2060 y 2061-2080 para dos rcp (4.5 y 8.5).

En la Figura 3 se observan pequeñas nuevas áreas con aptitud ambiental para *L. leucocephala*; ubicadas en la Sierra Madre Occidental, específicamente en los estados de Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango y Nayarit; en la Sierra Madre Oriental, en Nuevo León y Tamaulipas. También, el modelo pronostica mayores incrementos en la Sierra Madre del Sur, Istmo de Tehuantepec y en la Península de Yucatán; esto coincide con lo citado por Hu *et al.* (2015), quienes refieren que las tasas del cambio climático afectarán, dramáticamente, los grupos de comunidades y la biodiversidad en las zonas tropicales de la Tierra.

Aunque los rcp coinciden con la tendencia de variación de la superficie de aptitud ambiental, sí se diferencian en cuanto a la magnitud (Cuadro 2). Esto se debe, principalmente, a las variaciones de la precipitación, ya que el rcp 8.5 estima volúmenes anuales de lluvia más bajos en los dos periodos climáticos futuros.

Lo antes expuesto evidencia que las áreas con aptitud ambiental son sensibles a las variaciones de simulación climática de los rcp, incluso hasta en los modelos que se consideran similares en la predicción del cambio climático para México (Conde *et al.*, 2006).

Asimismo, se presentan algunas posibles áreas dinámicas con aptitud ambiental que responden al cambio climático (Figura 3); mismas que aparecen en las regiones centro y norte de México, y que ya han sido registradas con cambios en los patrones de cultivo, debido al cambio climático (Ramírez *et al.*, 2011; Santillán-Espinoza *et al.*, 2011).

Las diferencias en las proyecciones de la superficie con aptitud ambiental para *L. leucocephala*, en las trayectorias de concentración de GEI del modelo de circulación general utilizado, coinciden con lo referido por Beaumont *et al.* (2008), quienes mencionan que, independientemente del modelo que se utilice para calcular la pérdida de la biodiversidad al cambiar las trayectorias de emisiones de gases efecto invernadero, los resultados obtenidos pueden ser contrastantes.

En la Figura 3, también se perciben pequeñas áreas con aptitud ambiental que *L. leucocephala* pierde en los escenarios futuros, las cuales se localizan principalmente para los cuatro rcp, en los estados de Jalisco, Michoacán, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Puebla, Morelos, Veracruz, Tabasco y Península de Yucatán. Información similar a la señalada por Uribe (2015), en el sentido de que el cambio climático pronosticado para el 2050, tendrá graves impactos sobre la biodiversidad en el territorio mexicano.

Conclusiones

El cambio climático previsto para los periodos 2041-2060 y 2061-2080, con las trayectorias representativas de concentración de GEI (rcp 4.5 y rcp 8.5), incrementará la superficie con aptitud ambiental para *L. leucocephala*, principalmente, en regiones de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y en gran parte de la Península de Yucatán. La ganancia en superficie con AA será mayor con el rcp 4.5 para los dos periodos climáticos, con un promedio de 67 %; para el rcp 8.5 el modelo pronostica aumentos en la superficie con AA hasta de 53 %, en promedio para ambos periodos climáticos.

Leucaena leucocephala se adapta a un amplio intervalo de condiciones de precipitación y temperatura, lo que le provee ventajas adaptativas a los ambientes con variación climática.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional Forestal (Conafor), por el acceso a la base de datos de las coordenadas geográficas de presencia de la especie.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Noé Durán Puga: elaboración del manuscrito en lo relativo al *abstract*; José Ariel Ruiz Corral: elaboración del manuscrito en lo relativo al *abstract*, resultados, discusión y conclusiones; Diego Raymundo González Eguiarte: revisión general, apoyo en resultados y discusión; José Ángel Martínez Sifuentes: revisión general y apoyo en lo relativo al *abstract*.

Referencias

Bacab, H. M., N. B. Madera, F. J. Solorio, F. Vera y D. F. Marrufo. 2013. Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(3): 67-81. <http://www.ganaderialaluna.com/pdf/5.pdf> (17 de enero de 2019).

Beaumont, L. J., L. Hughes and A. J. Pitman. 2008. Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? *Ecology Letters* 11:1135-1146. Doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01231.x.

Beaumont, L. J., A. Pitman, S. Perkins, N. E. Zimmermann, N. G. Yoccoz and W. Thuiller. 2011. Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108(6): 2306–2311. Doi:10.1073/pnas.1007217108.

Bellard, C., C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller and F. Courchamp. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters* 15: 365-377. Doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x.

Bertrand, R., V. Perez and J-C. Gégout 2012. Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under climate change: the case of *Quercus pubescens* in France. *Global Change Biology* 18(8): 2648–2660. Doi:10.1111/j.1365-2486.2012.02679.x.

Carvalho, B. M., E. F. Rangel and M. M. Vale. 2017. Evaluation of the impacts of climate change on disease vectors through ecological niche modelling. *Bulletin of Entomological Research* 107: 419–430. Doi:10.1017/S0007485316001097.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2016. Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS 2004-2009). Comisión Nacional Forestal.
[https:// datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-forestal-y-de-suelos](https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-forestal-y-de-suelos)
(15 de enero de 2019).

Conde, C., R. Ferrer and S. Orozco. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*. 19(3):181-194.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362006000300003 (15 de enero de 2019).

Costa, G. C., C. Nogueira, R. B. Machado and G. R. Colli. 2010. Sampling bias and the use of ecological niche modeling in conservation planning: a field evaluation in a biodiversity hotspot. *Biodiversity and Conservation* 19: 883-900. Doi: 10.1007/s10531-009-9746-8.

Cook, B. G., B. C. Pengelly, S. D. Brown, J. L. Donnelly, D. A. Eagles, M. A. Franco, J. Hanson, B. F. Mullen, I. J. Partridge, M. Peters y R. Schultze-Kraft. 2005. *Forrajes Tropicales*. CSIRO, DPI & F (Queensland), el CIAT y el ILRI. Brisbane, Australia. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/49072> (17 de enero de 2019).

Eastman, J. R. 2012. *Idrisi Selva Manual, Manual Version 17*. Clark Labs, Clark University. Worcester, 10. Worcester, MS, USA. 322 p. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf> (17 de enero de 2019).

Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberón, S. Williams, M. S. Wisz and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151. Doi:10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2010. *ArcGIS Desktop: Release 10*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, USA. 15 p. http://earthobservations.org/about_geo.shtml (27 de enero de 2019).

Guitérrez, E. e I. Trejo. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 85: 179-188. Doi: 10.7550/rmb.37737.

Heuzé, V. and G. Tran. 2015. *Leucaena (Leucaena leucocephala)*. Feedipedia. Un programa de INRA, CIRAD, AFZ y FAO. <https://www.feedipedia.org/node/282> (22 de octubre de 2019).

Hanley, J. A. and B. J. McNeil. 1982. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. *Radiology* 143: 29-36.

Doi: 10.1148/radiology.143.1.7063747.

Hu, G. X., Y. Jin, R. X. Wang, F. J. Mao and Y. Li. 2015. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis*.

PLoS One. 10(7): 1-15. Doi: 10.1371/journal.pone.0132326.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Core Writing Team. *In*: Pachauri, R. K. and L. A. Meyer (eds.). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Italy. 31 p.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (2009). *Guía para interpretación cartográfica: uso de suelo-vegetación Serie III*. D. F. México. 71 p.

[https://snigf.cnf.gob.mx/wp-](https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Documentos%20metodologicos/Guia%20interpretar%20cartografia.pdf)

[content/uploads/Documentos%20metodologicos/Guia%20interpretar%20cartografia.pdf](https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Documentos%20metodologicos/Guia%20interpretar%20cartografia.pdf)

(15 de enero 2019).

Lasco, R. D., F. B. Pulhin, P. A. J. Sánchez, G. B. Villamor, K. A. L. Villegas. 2008. Climate change and forest ecosystems in Philippines: Vulnerability, adaptability and mitigation.

Journal of Environmental Science and Management 11(1): 1-14.

https://www.researchgate.net/publication/237298215_Climate_Change_and_Forest_Ecosystems_in_the_Philippines_Vulnerability_Adaptation_and_Mitigation (27 de enero de 2019).

Liu, C., G. Newell and M. White. 2016. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution* 6(1): 337–348.

Doi: 10.1002/ece3.1878.

Loya O., J. L., S. Martínez G., O. F. Prado R., Y. S. Valdés G., A. A. Gómez D., F. Escalera V., R. Macedo B. y N. Durán P. 2014. *El sistema Silvopastoril*. Sistema superior editorial. Tepic, Nay., México. 104 p.

McMahon, S. M., S. P. Harrison, W. S. Armbruster, P. J. Bartlein, C. M. Beale, M. E. Edwards, J. Kattge, G. Midgley, X. Morin and I. P. Prentice. 2011. Improving assessment and modelling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* 26(5): 249–259.

Doi:10.1016/j.tree.2011.02.012.

Medina G., G., J. A. Ruiz C. y R. A. Martínez P. 1998. Los climas de México: una estratificación ambiental basada en el componente climático. SAGAR-INIFAP, INIFAP/CIRPAC/Conexión gráfica. Guadalajara, Jal., México. 104 p.

Merow, C., M. J. Smith and J. A. Silander. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species distributions: what it does and why inputs and settings matter. *Ecography* 36: 1058-1069. Doi:10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.

Moreno, R., R. Zamora, J. R. Molina, A. Vásquez and M. Á. Herrera. 2011. Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forest using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics* 6(6): 364-370.

Doi: 10.1016/j.ecoinf.2011.07.003.

Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37: 637–669.

Doi: 10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100.

Parmesan, C., C. Duarte, E. Poloczanska, A. J. Richardson and M. C. Singer. 2011. Overstretching attribution. *Nature Climate Change* 1: 2–4.

Doi: 10.1038/nclimate1056.

Parolo, G., G. Rossi and A. Ferrarini. 2008. Toward improved species niche modelling: *Arnica montana* in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology* 45(5): 1410-1418. Doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01516.x.

Petit, A. J., F. Casanova L. y F. Solorio S. 2010. Rendimiento de forraje de *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* asociadas y en monocultivo en un banco de forraje. Revista Forestal Venezolana 54(2):161-167.

http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/32522/art4_judithpetit.pdf?sequence=1 (27 de enero de 2019).

Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190: 231-259.

Doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.

Phillips, S. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. Ecography 31: 161-175.

Doi: 10.1111/j.2007.0906-7590.05203.x.

Ramírez L., M. R., J. A. Ruiz C., G. Medina G., J. L. Jacobo C., R. A. Parra Q., M. R. R. Ávila M. y J. P. Amado A. 2011. Perspectivas del sistema de producción de manzano en Chihuahua, ante el cambio climático. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2 (especial 2): 265-279.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a8.pdf> (27 de enero de 2019).

Sánchez G., J. J., C. J. A. Ruiz C., G. Medina G., G. Ramírez O., L. De la Cruz L., J. B. Holland, R. Miranda M. and G. E. García R. 2018. Ecography of teosinte. PLoS ONE 13 (2): e0192676. Doi:10.1371/journal.pone.0192676.

Santillán-Espinoza, L., F. Blanco-Macías, R. Magallanes-Quintanar, J. L. García-Hernández, J. Cerano-Paredes, O. Delgadillo-Ruiz y R. D. Valdez-Cepeda. 2011. Tendencias de temperatura extremas en Zacatecas, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 2(especial 2): 207-219.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800004 (16 de enero de 2019).

Sarukhán, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta y J. de la Maza. 2009. Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F., México. 102 p.

https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Capital%20Natural%20de%20Mexico_Sintesis.pdf (16 de enero de 2019).

Schneider, R. R., A. Hamann, D. Farr, X. Wang and S. Boutin. 2009. Potential effects of climate change on ecosystem distribution in Alberta. *Can J For Res* 39(5): 1001-1010. Doi:10.1139/X09-033.

Visser, M. E. 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B* 275: 649-659. Doi:10.1098/rspb.2007.0997.

Steven, J. P., M. Dudík and R. E. Schapire. 2017. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1).

http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
(4 de febrero de 2020).

Uribe B., E. 2015. El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. CEPAL. Santiago, Chile. 86 p.

https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf;jsessionid=3EF3B8F75A9934A9CFAA8EB01BE4DCDF?sequence=1 (17 de enero de 2019).

Walton, D., J. Meyerson and J. D. Neelin. 2013. Accessing, Downloading and Viewing CMIP5 data. Earth System Grid Federation.

<https://modelingguru.nasa.gov/docs/DOC-2312> (10 de marzo de 2020).

Wang, G. 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global change models participating in the IPCC 4th assessment. *Climatic Dynamics*. 25(7): 739–753. Doi: 10.1007/s00382-005-0057-9.

Whitesell and Parrotta A. 2008. *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Project Forest Service Silvics of Forest Trees of the American Tropics, U. S. Forest Service. Río Piedras Negras, Puerto Rico. pp. 1-4.

https://www.researchgate.net/publication/237449765_Leucaena_leucocephala_Lam_de_Wit_leucaena (10 de marzo de 2020).

WorldClim. 2017. Free climate data for ecological modeling and GIS. WorldClim-Global Climate Data. <http://www.worldclim.org/> (5 de febrero de 2020).

Zárate, S. 1999. Ethnobotany and domestication process of *Leucaena* in México. *Journal of Ethnobiology* 19(1): 1-23.

<https://www.researchgate.net/publication/233730395> (15 de enero de 2019).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.