

Modelo de distribución potencial de *Leucaena leucocephala* y *Acacia farnesiana* para el Noreste de México

Potential distribution model of *Leucaena leucocephala* and *Acacia farnesiana* for Northeast Mexico

David Gilberto López-Cantú¹ , Aracely Maldonado-Torres¹ , Elizabeth Crespo-Reyes¹ , Glenda Nelly Requena-Lara² , Juan Francisco Morales-Pacheco² , Jonathan Raúl Garay-Martínez^{3*} 

¹Universidad para el Bienestar Benito Juárez García-Aldama. Carretera Estación Manuel-Aldama, km 33.5, CP. 89670. Aldama, Tamaulipas, México.

²Universidad Autónoma de Tamaulipas. 8 y 9 Matamoros, SN. Zona Centro, CP. 87000. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

³Campo Experimental Las Huastecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Carretera Tampico-Mante, km 55, CP. 89610. Altamira, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: garay.jonathan@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 18 de marzo 2024

Aceptado: 29 de septiembre 2024

RESUMEN. Los modelos de distribución potencial de especies son una herramienta que permiten la gestión, aprovechamiento y control de la biodiversidad. El objetivo de esta investigación fue modelar la distribución potencial de *Leucaena leucocephala* y *Acacia farnesiana* para el Noreste de México (Nuevo León y Tamaulipas). Se utilizaron 19 variables bioclimáticas para la construcción de los modelos, las cuales se obtuvieron de la base de datos WorldClim. Se utilizaron 143 registros de presencia de *A. farnesiana* y 82 registros para *L. leucocephala*. Los modelos de nicho ecológico se desarrollaron con el algoritmo de máxima entropía del software Maxent, se utilizó el valor del área bajo la curva, mediante el programa Tool for Partial-ROC y se utilizó el método Jackknife, para estimar la contribución relativa de cada variable climática. Los modelos mostraron una probabilidad de idoneidad desde 31 al 95% para *A. farnesiana* y desde 30 a 92% para *L. leucocephala*. Se observó mayor área de idoneidad para *A. farnesiana*, en Tamaulipas, mientras que para *L. leucocephala*, el área de idoneidad fue más reducida en todo el Noreste. El análisis del área bajo la curva mostró resultados de 0.869 para *L. leucocephala* y 0.787 para *A. farnesiana*, por lo cual se consideró como un desempeño estadísticamente confiable del modelo. En el Noreste de México, podría ser factible el aprovechamiento de *L. leucocephala* y *A. farnesiana* en los sistemas de ganadería extensiva, lo que permitiría aminorar los impactos negativos de esta actividad productiva en el ambiente y los agroecosistemas ganaderos.

Palabras clave: Clima árido, clima semiárido, leguminosa forrajera, variables bioclimáticas.

ABSTRACT. Models of potential distribution of species are a tool that allows the management, use and control of biodiversity. The objective of this research was to model the potential distribution of *Leucaena leucocephala* and *Acacia farnesiana* for Northeast Mexico (Nuevo León and Tamaulipas). A total of 19 bioclimatic variables were used to construct the models, which were obtained from the WorldClim database. A total of 143 records of *A. farnesiana* and 82 records of *L. leucocephala* were used. The ecological niche models were developed with the maximum entropy algorithm of the Maxent software, the value of the area under the curve was used, using the Tool for Partial-ROC program and the Jackknife method was used to estimate the relative contribution of each climate variable. The models showed a probability of suitability from 31 to 95% for *A. farnesiana* and from 30 to 92% for *L. leucocephala*. A larger area of suitability was observed for *A. farnesiana* in Tamaulipas, while for *L. leucocephala*, the area of suitability was smaller throughout the Northeast. The analysis of the area under the curve showed results of 0.869 for *L. leucocephala* and 0.787 for *A. farnesiana*, which is considered a statistically reliable performance of the model. In northeastern Mexico, it could be feasible to use *L. leucocephala* and *A. farnesiana* in extensive livestock systems, which would reduce the negative impacts of this productive activity on the environment and livestock agroecosystems.

Keywords: Arid climate, semi-arid climate, forage legume, bioclimatic variables.

Como citar: López-Cantú DG, Maldonado-Torres A, Crespo-Reyes E, Requena-Lara GN, Morales-Pacheco JF, Garay-Martínez JR (2024) Modelo de distribución potencial de *Leucaena leucocephala* y *Acacia farnesiana* para el Noreste de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. IV: e4071. DOI: 10.19136/era.a11nIV.4071.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno del cambio climático (CC) afecta a los ecosistemas terrestres de manera diferenciada en distintas regiones del mundo, esto, como resultado de las intensas interacciones entre los factores ambientales y socioeconómicos en el uso de la tierra, influyendo así en la vulnerabilidad y resiliencia de los sistemas productivos (Franzluebbers y Hendrickson 2024). Ante este hecho, surge la necesidad de modelar los probables impactos del CC en los sistemas de producción agrícolas, pecuarios y forestales, de tal manera que sea posible establecer medidas de mitigación y adaptación ante los cambios esperados en dichos sistemas (Calvas-Serrano *et al.* 2024).

Existen diferentes metodologías para la identificación de sitios, en los cuales, organismos de flora y fauna podrían establecerse y desarrollarse con éxito, es decir, métodos para modelar la posible distribución geográfica y ecológica de las especies (Antúnez *et al.* 2017, Gutiérrez y Trejo 2022). Estos modelos han abordado cuestionamientos a diferentes escalas, desde el efecto del CC en la distribución del hábitat (Romero-Sánchez *et al.* 2017), hasta la delimitación de especies y la evolución de sus nichos (Sillero *et al.* 2021), así como también, procesos ecológicos como los cambios de rango (especiación, expansión, invasión, extinción) e interacciones (competencia, hibridación, evolución morfológica) (González-Cubas *et al.* 2020), mediante los llamados Modelos de Nicho Ecológico (MNE) reportados por Soberón *et al.* (2017) y Jiménez y Méndez (2021).

El nicho ecológico, es aquella región del espacio ambiental donde puede existir una especie, dependiendo de variables como la dispersión e interacciones bióticas, de tal manera que pueden determinar el área donde existe una especie (nicho realizado) y el área con las condiciones abióticas aceptables para la especie (nicho fundamental) (Bradie y Leung 2017, Gutiérrez *et al.* 2018). En otras palabras, los MNE asocian el área abióticamente adecuada de una especie con condiciones ambientales disponibles en las localidades donde se presenta la especie (Manzanilla-Quijada *et al.* 2020). Por tanto, es posible obtener en un territorio geográfico, la distribución espacial de los entornos más adecuados para la presencia de una especie (Palacios *et al.* 2021). De tal manera que los MNE son una representación matemática de cómo las distribuciones de los organismos están limitadas por el ambiente, correlacionando puntos de presencia con variables ambientales, brindando además la posibilidad de crear mapas mediante los cuales es posible representar distribuciones potenciales o contemporáneas de una especie (Maciel-Mata *et al.* 2015, Soberón *et al.* 2017, CONABIO 2023a).

Actualmente hay una variedad de softwares que correlacionan la presencia de las especies con coberturas ambientales para estimar mapas que representan MNE y/o MDE (Modelos de Distribución de Especies) como los reportados por Soberón *et al.* (2017), y Melo-Merino *et al.* (2020). Estos programas se basan en inteligencia artificial y en algoritmos matemáticos; para obtener información confiable independientemente si el número de registro de datos usados son abundantes o limitados (Flores-Tolentino *et al.* 2019, Pozo-Gómez *et al.* 2022).

Alrededor del mundo y particularmente en México, existe una gran diversidad de especies arbóreas y arbustivas con diferentes usos en la actividad agropecuaria, y son consideradas como un recurso multipropósito importante en los agroecosistemas pecuarios, siendo el uso forrajero uno de los principales, el cual es aprovechado para la alimentación de rumiantes (Guerrero-

Rodríguez *et al.* 2021). En este sentido, en el Noreste de México (NM), destacan dos especies: *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., y *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (Martínez-Hernández *et al.* 2019, Molina *et al.* 2023). La primera por su aptitud para ser incorporada en sistemas agroforestales y distribución amplia en zonas tropicales, subtropicales, áridas y semiáridas (Martínez-Hernández *et al.* 2019); la segunda está ampliamente distribuida en el Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET), formando parte de la vegetación ruderal y por su capacidad para adaptarse a condiciones medioambientales adversas (Molina *et al.* 2023). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue modelar la distribución potencial de *Leucaena leucocephala* y *Acacia farnesiana* para el Noreste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio comprendió la región Noreste de México (NM) en la cual se encuentran amplias zonas dominadas por el MET, este ecosistema se distribuye desde el sur de Texas (Estados Unidos), hasta Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con una superficie continua de 125 000 y hasta los 200 000 km² (Figura 1), presentando también áreas con condiciones semiáridas y subhúmedas en esta región (Patiño-Flores *et al.* 2022). Para el alcance de esta investigación solo se consideró como NM a los Estados de Nuevo León y Tamaulipas, los cuales comparten la Gran Llanura de Norteamérica y la Llanura Costera del Golfo Norte; además presentan similitudes en fuentes productoras de biomasa, principalmente en especies del estrato herbáceo (Guzmán-Lucio *et al.* 2016). Ambos Estados abarcan de manera conjunta una superficie de 14.4 millones de hectáreas, de las cuales, Tamaulipas y Nuevo León destinan 4.9 y 3.0 millones de hectáreas a las actividades agropecuarias, 63 y 47% del total Estatal, respectivamente (INEGI 2022a). En el NM predominan los climas de tipo cálido subhúmedo A(w), semicálido subhúmedos AC(w,x), semiseco muy cálido y cálido BS₁(h'), seco muy cálido y cálido BS₀(h')w(w) y seco semicálido BSh (INEGI 2022b).

Descripción de las especies modeladas

Las especies modeladas fueron *Acacia farnesiana* (L.) Willd. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.; las cuales sobresalen de sus requerimientos ecológicos por su capacidad para tolerar la sequía, incluso durante su establecimiento y pueden soportar entre 6 y 8 meses de periodo seco (Tabla 1).

Modelación

Los modelos de nicho ecológico para *A. farnesiana* y *L. leucocephala* para el Noreste de México, se desarrollaron con el algoritmo de máxima entropía del software Maxent Ver. 3.3.3k (Phillips *et al.* 2006). De los múltiples programas disponibles, destaca Maxent, el cual permite proyectar patrones de distribuciones geográficas mediante el empleo de MNE, utilizando registros observados de presencias puntuales (Pérez-García y Liria 2013, Menezes 2023). Una de las características importantes de Maxent, es que se pueden hacer predicciones a partir de información incompleta, estimando la distribución más uniforme para el área estudiada; además es considerado un algoritmo confiable por su buen desempeño (Charre-Medellín *et al.* 2019). Para la construcción de los modelos se utilizaron 19 variables bioclimáticas, las cuales se obtuvieron de la base de datos

WorldClim 1.3 (Hijmans *et al.* 2005). Los registros de presencia de las especies se obtuvieron de las bases de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF), de la Comisión Nacional sobre la Biodiversidad (CONABIO) y se completaron con registros de campo. La base de datos final de registros de presencia fue depurada con el visualizador de Google Earth™ (Pérez-García y Liria 2013) para descartar datos erróneos, localidades inciertas y duplicación de datos. Se utilizaron 143 registros de presencia de *A. farnesiana*, obtenidos de 8 conjuntos de datos publicados en la base de datos GBIF (Figura 1). Las fuentes de información de la base de datos GBIF son: Catálogo electrónico de especímenes depositados en el Herbario de la Universidad de Texas en Austin, Fase IV; Inventario florístico de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas; Lista florística preliminar de Tamaulipas; Tropicos Specimen Data; The New York Botanical Garden Herbarium; Análisis de viabilidad para poblaciones de la cactácea amenazada *Ariocarpus trigonus*; Actualización de las bases de datos del Herbario XAL. Fase III; Etapa final de la captura y catalogación del Herbario del Instituto de Ecología, AC, Centro Regional del Bajío; iNaturalist Research-grade Observations; Determinación del estado actual de cinco especies de cactáceas amenazadas del estado de Tamaulipas, México. Para el caso de *Leucaena leucocephala*, se obtuvieron 82 registros (Figura 1). Las fuentes de información para la obtención de los registros de presencia fueron las bases de datos de la CONABIO (Colecciones Enciclovida y Naturalista), Herbario Nacional (MEXU) del Instituto Nacional de Biología de la UNAM y Herbario del Instituto Nacional de Ecología (INECOL), además de registros generados en salidas de campo.

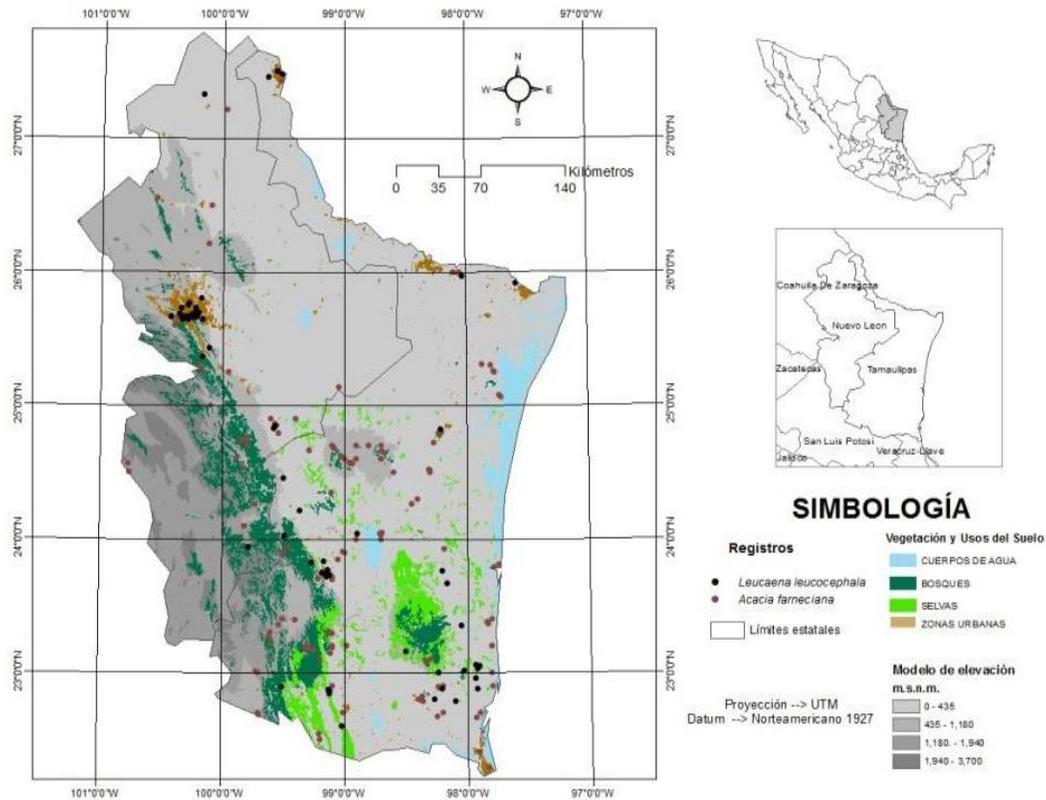


Figura 1. Área de estudio, Noreste de México (Nuevo León y Tamaulipas).

Tabla 1. Requerimientos ecológicos para *Acacia farnesiana* (L.) Willd., y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Especie	Variables Biofísicas*						Referencia
	Ppma (mm)	Tma (°C)	Tmmf (°C)	Tmmc (°C)	Psa (meses)	Alt (msnm)	
<i>A. farnesiana</i>	1 200 - 2 500	22 - 24	> 18	26 - 28	0 - 6	-	Gómez <i>et al.</i> (2011)
	250 - 5 000	20 - 32	10 - 20	20 - 42	-	0 - 2 100	FAO (2024)
	350 - 2 300	22 - 30	-	-	4 - 6	0 - 900	CONABIO (2023b)
<i>L. leucocephala</i>	100 - 1 400	16 - 26	14 - 20	20 - 26	2 - 8	-	Gómez <i>et al.</i> (2011)
	400 - 1 400	20 - 32	7 - 20	32 - 42	-	1 300	FAO (2024)
	400 - 1 500	24	13 - 15	> 30	-	0 - 1 500	CONABIO (2023b)

*Ppma: Precipitación media anual; Tma: Temperatura media anual; Tmmf: Temperatura del mes más frío; Tmmc: Temperatura del mes más caliente; Psa: Periodo seco anual; Alt: Altitud.

Análisis estadístico

Para determinar la validez de los modelos, se utilizó el valor AUC (Área Bajo la Curva, por sus siglas en inglés) del análisis de la curva operacional ROC (Receiver Operating Characteristic, por sus siglas en inglés) y ROC parcial, mediante el programa Tool for Partial-ROC (Narayani 2008), utilizando un 50% de los puntos de evaluación independientes re-muestreados en 1 000 réplicas (bootstrap) y fijando un error de omisión no mayor al 5% (1-omission threshold > 0.95) al modelo. Además, se utilizó el método Jackknife, instrumentado en Maxent, para estimar la contribución relativa de cada variable climática.

RESULTADOS

Los modelos de nicho ecológico muestran una probabilidad de idoneidad desde 31 al 95% para *A. farnesiana* y desde 30 a 92% para *L. leucocephala* (Figura 2). Los resultados de la modelación sugieren que existen condiciones bioclimáticas adecuadas en amplias zonas geográficas del Noreste de México para la presencia de las especies. Representando un área mayor de idoneidad para *A. farnesiana*, en el estado de Tamaulipas, mientras que para *L. leucocephala*, el área de idoneidad es más reducida en todo el Noreste, destacando zonas más extensas para el estado de Tamaulipas con relación a Nuevo León.

El análisis del Área Bajo la Curva de la función ROC, muestran resultados de 0.869 para *L. leucocephala* y 0.787 para *A. farnesiana* (Figura 3), por lo cual se consideró como un desempeño estadísticamente confiable.

El método Jackknife instrumentado en el programa Maxent, mostró que las variables bioclimáticas con mayor contribución para la probabilidad de presencia en el MNE para *L. leucocephala* fueron: el rango de temperatura anual, precipitación del mes más húmedo, rango medio diurno/rango de temperatura anual, precipitación del trimestre más frío y temperatura media del trimestre más cálido. Mientras que para *A. farnesiana* fueron temperatura estacional, precipitación del trimestre más húmedo y precipitación del trimestre más cálido (Tabla 2).

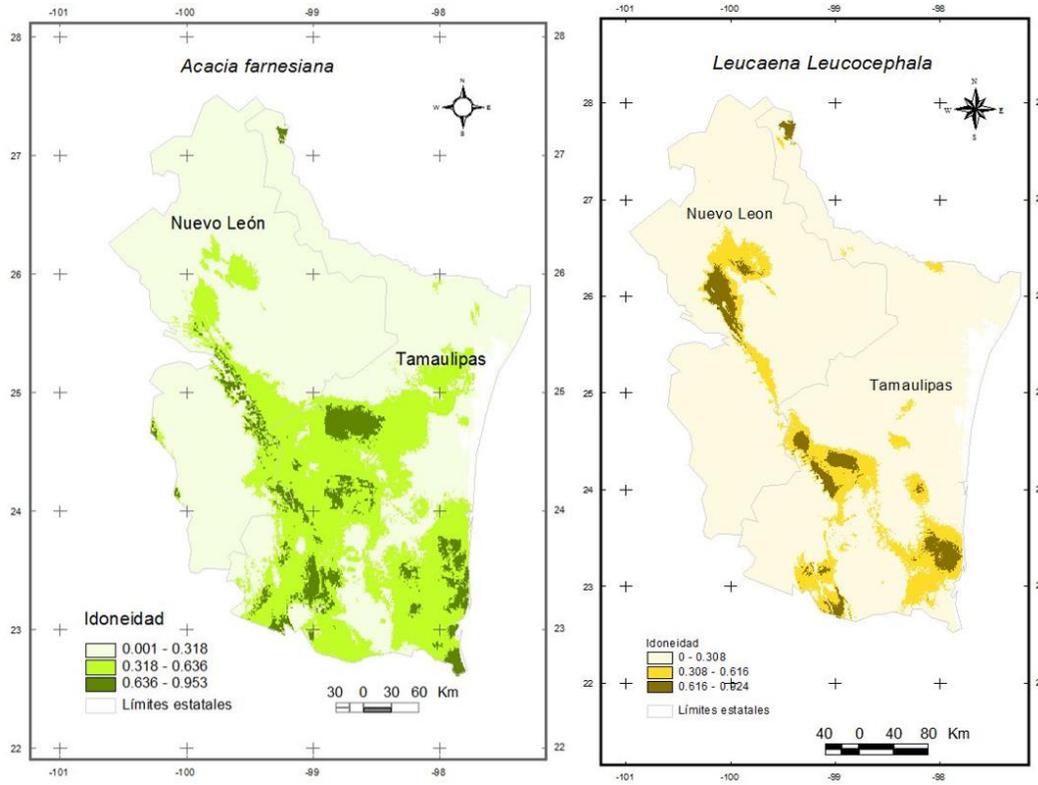


Figura 2. Modelo de Nicho Ecológico de *Acacia farnesiana* (L.) Willd., y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., en el Noreste de México.

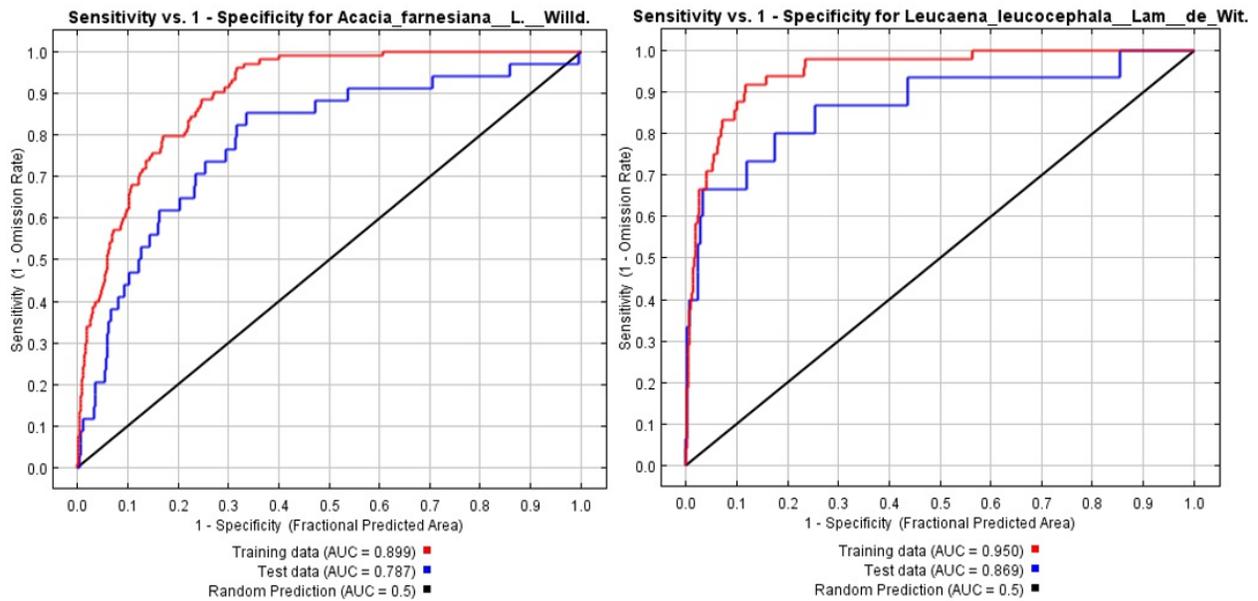


Figura 3. Área bajo la curva (AUC) de *Acacia farnesiana* (L.) Willd., y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Tabla 2. Contribución de las variables bioclimáticas en la probabilidad del modelos de nicho ecológico para *Acacia farnesiana* (L.) Willd., y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

Variable	Código	Contribución (%)	
		<i>A. farnesiana</i>	<i>L. leucocephala</i>
Rango medio diario/Rango de Temperatura Anual	BIO 3		13.2
Temperatura Estacional	BIO 4	28.2	-
Rango de Temperatura Anual	BIO 7	-	21.1
Temperatura media del trimestre más cálido	BIO 10	-	10.6
Precipitación del mes más húmedo	BIO 13	-	15.2
Precipitación del trimestre más húmedo	BIO 16	18.6	-
Precipitación del trimestre más cálido	BIO 18	10.3	-
Precipitación del trimestre más frío	BIO 19	-	11.6

DISCUSIÓN

Los MNE ofrecen resultados normalmente muy diferentes entre sí, por lo que la interpretación de cómo juzgar los modelos desde un punto de vista estadístico, es de gran relevancia (Melo-Merino *et al.* 2020). La validación se refiere a la evaluación de la exactitud en las predicciones de un modelo de distribución de especies (Sillero *et al.* 2021). El método del valor AUC del análisis ROC ha sido aplicado extensamente con tal propósito (Menezes 2023). Este método se ha convertido en una herramienta dominante para evaluar la precisión de los modelos que predicen la distribución de especies (Melo-Merino *et al.* 2020, Brown y Griscom 2022). En términos comparativos, el estadístico derivado del análisis de área bajo la curva ROC y que le da soporte estadístico, es equivalente al estadístico U de Mann-Whitney (Sillero *et al.* 2021).

En su interpretación el AUC, varía de 0 a 1 y representa una medida del desempeño general del modelo, la cual permite discriminar áreas adecuadas contra áreas no adecuadas (Anderson y González 2011). Los valores de AUC pasan desde 0.5 para los modelos sin capacidad predictiva hasta 1.0 para los modelos que brindan predicciones más acertadas (Brown y Griscom 2022). En otras palabras, un valor de 1.0 indica que todos los casos se han clasificado correctamente y uno de 0.5 que el modelo no es diferente de clasificar los casos al azar; valores menores a 0.5 indican que el modelo es realmente desfavorable, ya que clasifica erróneamente más casos que el azar (Sillero *et al.* 2021).

Es conveniente hacer mención que, el análisis ROC es sujeto de cuestionamientos cuando se utilizan datos de solo presencia, ya que, sobre la base teórica, este análisis también requiere datos de ausencias. Es decir, las predicciones espaciales pueden presentar errores de omisión (falsos negativos, dejando fuera el área de distribución conocida) y errores de comisión (falsos positivos, incluidas áreas inadecuadas en la predicción). Ante esto, la modificación del ROC, para utilizar el enfoque de ROC parcial, proporciona una base más estable para la evaluación de predicciones de MNE y corregir dichos errores (Sillero *et al.* 2021). Al emplear el método de Jackknife, se encontró que la probabilidad de la presencia de *L. leucocephala* y *A. farnesiana* en el MNE, estuvo asociada a

las variables bioclimáticas. Este comportamiento es similar a los resultados reportados por Antúnez *et al.* (2017), quienes señalan que las variables bioclimáticas de temperaturas (mínimas y máximas) y precipitación tienen una contribución significativa en la distribución de especies arbóreas.

El MNE mostró una reducción en el área de idoneidad para el Noreste de México en el caso de *L. leucocephala*, esto es debido a que las condiciones biofísicas en el Noreste de México no son del todo propicias para esta especie, en esta región del país, donde además predomina el MET como lo mencionan Molina *et al.* (2023), FAO (2024), CONABIO (2023b) y Gómez *et al.* (2011). Sin embargo, el MNE muestra que destacan zonas más extensas para esta misma especie para Tamaulipas con relación a Nuevo León. Esto puede ser posible a la capacidad de *L. leucocephala*, para desarrollarse y prosperar con éxito en amplias zonas tropicales, como lo indican Martínez-Hernández *et al.* (2019).

El resultado de la modelación muestra que son estadísticamente confiable mediante el análisis del Área Bajo la Curva de la función ROC, lo cual le da validez al modelo obtenido para *L. leucocephala* y *A. farnesiana*, como está indicado por Sillero *et al.* (2021). Los resultados estadísticos de 0.869 para *L. leucocephala* y 0.787 para *A. farnesiana*, representan la probabilidad de encontrar más áreas de idoneidad entre las especies aquí modeladas, específicamente con relación a los estados de Tamaulipas y Nuevo León en el Noreste de México, este desempeño es semejante a lo que indican Anderson y González (2011) y Sillero *et al.* (2021), con relación a la capacidad del AUC para discriminar áreas adecuadas contra áreas no adecuadas.

Las especies modeladas pueden tener un impacto positivo en el medio ambiente, principalmente por los atributos que distinguen a la familia de las leguminosas (fabaceae) como: la fijación simbiótica de nitrógeno, valor nutritivo alto, sistema radicular pivotante profundo, amplia diversidad taxonómica-genética y brindan importantes servicios ambientales (Apan-Salcedo *et al.* 2021). Estas características les confieren a las leguminosas una ventaja ecológica significativa sobre otras familias de plantas en los sistemas agropecuarios (Schultze-kraft *et al.* 2018).

CONCLUSIONES

Existen condiciones biogeográficas adecuadas, de acuerdo a la probabilidad de idoneidad de presencia de las especies de leguminosas arbustivas *Leucaena leucocephala* y *Acacia farnesiana* en el Noreste de México, por lo que podría ser factible su aprovechamiento en los sistemas de ganadería extensiva prevalecientes en esta región, propiciando una reconversión productiva de manera sustentable, lo que permitiría aminorar los impactos poco favorables de esta actividad productiva en los agroecosistemas ganaderos y el ambiente.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

LITERATURA CITADA

- Anderson RP, Gonzalez I (2011) Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: An implementation with Maxent. *Ecological Modelling* 222 (15): 2796-2811. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.011>.
- Antúnez P, Hernández-Díaz JC, Wehenkel C, Clark-Tapia R (2017) Generalized models. An application to identify environmental variables that significantly affect the abundance of three tree species. *Forests* 8(3): 59. <https://doi.org/10.3390/f8030059>.
- Apan-Salcedo GW, Jiménez-Ferrer G, Nahed-Toral J, Pérez-Luna E, Piñeiro-Vázquez ÁT (2021) Masificación de sistemas silvopastoriles: un largo y sinuoso camino. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(3): 103. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3524>.
- Bradie J, Leung B (2017) A quantitative synthesis of the importance of variables used in Maxent species distribution models. *Journal of Biogeography* 44(6): 1344-1361. <https://doi.org/10.1111/jbi.12894>.
- Brown CH, Griscom HP (2022) Differentiating between distribution and suitable habitat in ecological niche models: A red spruce (*Picea rubens*) case study. *Ecological Modelling* 472: 110102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110102>.
- Calvas-Serrano G, Maita J, Angamarca E, Eguiguren P, Veintimilla D (2024) Impactos del cambio climático en la distribución potencial de especies forestales priorizadas de la Amazonía Ecuatoriana. *Bosques Latitud Cero* 14(1): 31-46. <https://doi.org/10.54753/blc.v14i1.2115>.
- Charre-Medellín JF, Mas JF, Chang-Martinez LA (2019) Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo Maxent en escenarios de cambio climático. *UD y la Geomática* 14: 26-33.
- CONABIO (2023a) Distribución de las especies. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribesp>. Fecha de consulta: 19 de julio de 2024.
- CONABIO (2023b) Árboles mexicanos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.snib.mx/iptconabio/resource?r=SNIB-J084>. Fecha de consulta: 19 de julio de 2024.
- FAO (2024) ECOCROP Database of Crop Constraints and Characteristics. Food and Agricultural Organization. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop>. Fecha de consulta: 19 de julio de 2024.
- Flores-Tolentino M, Ortiz E, Villaseñor JL (2019) Modelos de nicho ecológico como herramienta para estimar la distribución de comunidades vegetales. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 902: e902829. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2829>.
- Franzluebbbers AJ, Hendrickson JR (2024) Should we consider integrated crop-livestock systems for ecosystem services, carbon sequestration, and agricultural resilience to climate change? *Agronomy Journal* 116(2): 415-432. <https://doi.org/10.1002/agj2.21520>.
- Gómez JD, Monterroso AI, Tinoco JA, Toledo ML (2011) Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera* 24(1): 31-52.
- González-Cubas R, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón OA, Foroughbakhch-Pournavab R (2020) Distribución potencial de *Abies vejarii* (Pinaceae) y su relación con factores ambientales, topográficos y antropogénicos en el noreste de México. *Acta Botánica Mexicana* 127: e1607. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1607>.
- Guerrero-Rodríguez JD, Bustamante-González A, Aceves-Ruíz E, Vargas-López S, Calderón-Sánchez F, Pérez-Ramírez E, Olvera-Hernández JI (2021) Abundancia, producción de materia seca y valor nutricional de leguminosas arbustivas forrajeras del trópico seco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. II: e2881*. <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2881>.

- Gutiérrez E, Trejo I (2022) Aplicación de diferentes tipos de datos en el modelado de la distribución de especies arbóreas en México. *Colombia Forestal* 26(1): 48-63. <https://doi.org/10.14483/2256201X.19392>.
- Gutiérrez O, Cámara R, Senciales JM, García LV (2018) Modelos predictivos en Biogeografía: aplicación para la modelización de nichos ecológicos en Geografía Física. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 78: 88-126. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2395>.
- Guzmán-Lucio MA, Foroughbakhch-Pournavab R, Alvarado-Vázquez MA, Rocha-Estrada A, Salcedo-Martínez SM, Moreno-Limón S (2016) Gramíneas de los mezquiales en el centro-norte de Nuevo León. *Polibotánica* 42: 19-42. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.42.2>.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15): 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>.
- INEGI (2022a) Censo Agropecuario (CA) 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>. Fecha de consulta: 19 de julio de 2024.
- INEGI (2022b). Climas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjI0LjExNjM0LGxvbjotOTguNzEwNTUsejozLGw6YzQxMHxjNDE4>. Fecha de consulta: 19 de julio de 2024.
- Jiménez MA, Méndez J (2021) Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carriére bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 27(3): e2732117. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732117>.
- Maciel-Mata CA, Manríquez-Morán N, Octavio-Aguilar P, Sánchez-Rojas G (2015) El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria* 25(2): 3-19. <https://doi:10.15174/au.2015.690>.
- Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ, Vargas-Larreta B, López-Martínez JO, Mata Balderas JM (2020) Áreas idóneas con potencial para la producción de semillas de *Pinus chihuahuana* Engelm. y *Pinus leiophylla* Schhltdl. & Cham. en México. *Botanical Sciences* 98(2): 305-316 <https://doi.org/10.17129/botsci.2514>.
- Martínez-Hernández PA, Cortés-Díaz E, Purroy-Vásquez R, Palma-García JM, Del Pozo-Rodríguez PP, Vite-Cristóbal C (2019) *Leucaena leucocephala* (LAM.) de Wit. especie clave para una producción bovina sostenible en el trópico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 22(2): 331-357. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2707>.
- Melo-Merino S, Reyes-Bonilla H, Lira-Noriega A (2020) Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecological Modelling* 415: 108837. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108837>.
- Menezes JFS (2023) Comparando las estimaciones de selección de hábitat mediante modelos de distribución de especies y step selection functions. *Ecosistemas* 32(2): 2455. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2455>.
- Molina VM, Alanís E, Mora A, Rubio EA, González AT (2023) Diversidad y estructura de especies arbóreas en localidades rurales de Hualahuises, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(79): 344-354. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.134>.
- Narayani B (2008) Tool for partial-ROC. Biodiversity Institute, Lawrence KS. Versión 1.0.
- Palacios A, Jiménez E, Rodríguez R, Razo R (2021) Distribución potencial de *Prosopis leavigata* (Humb. et Bonpl. ex Wiilld. M.C. Johnst en el estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(63): 71-87. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.812>.
- Patiño-Flores AM, Alanís-Rodríguez E, Molina-Guerra VM, Jurado E, González-Rodríguez H, Aguirre-Calderón OA, Collantes-Chávez-Costa A (2022) Regeneración natural en un área restaurada del matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1): e2853. <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2853>.

- Pérez-García B, Liria J (2013) Modelos de nicho ecológico fundamental para especies del género *Thraulodes* (Ephemeroptera: Leptophlebiidae: Atalophlebiinae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 84: 600-611. <https://doi.org/10.7550/rmb.32234>.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modelin of species geogeographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4): 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>.
- Pozo-Gómez DM, Orantes-García C, Sánchez-Cortés MS, Rioja-Paradela T, Carrillo-Reyes A (2022) Tendencias mundiales en el modelado de la distribución de especies arbóreas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 30(1): 1-19. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.074>.
- Romero-Sánchez ME, González-Hernández A, Pérez-Miranda R, Velasco-Bautista E, Moreno-Sánchez F (2017) Efecto del cambio climático a nivel local en la distribución potencial de cuatro especies forestales de la Cuenca Río Bravo-San Juan, Coahuila, México. *Agroproductividad* 10(8): 42-47.
- Schultze-kraft R, Rao IM, Peters M, Clements RJ, Bai C, Liu G (2018) Tropical forage legumes for environmental benefits: An overview. *Tropical Grasslands-Forrajcs Tropicales* 6(1): 1-14. [https://doi.org/10.17138/tgft\(6\)1-14](https://doi.org/10.17138/tgft(6)1-14).
- Sillero N, Arenas-Castro S, Enriquez-Urzelai U, Gomes C, Sousa-Guedes D, Martínez-Freiría F, Real R, Barbosa AM (2021) Want to model a species niche? A step-by-step guideline on correlative ecological niche modelling. *Ecological Modelling* 456: 109671. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109671>.
- Soberón J, Osorio-Olvera L, Peterson T (2017) Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88(2): 437-441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>.