

Cambio climático sobre la distribución de *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae): una víctima del calentamiento global

Climate change on the distribution of *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae): a victim of global warming

Sonia Pérez-Mayorga ^a , Fabio Suzart de Albuquerque ^b ,
Miguel Ángel Macías-Rodríguez ^c , Eduardo Salcedo-Pérez ^{d*} 

^a Universidad de Guadalajara, Departamento de Botánica y Zoología-CUCBA, Doctorado BEMARENA, México.

^b Arizona State University, College of Integrative Sciences and Arts, Science and Mathematics, Mesa, Estados Unidos.

^c Universidad de Guadalajara, Departamento de Ciencias Ambientales-Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, México.

* Autor de correspondencia: ^d Universidad de Guadalajara,
Departamento de Botánica y Zoología-Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, México,
eduardo.salcedo@academicos.udg.mx

ABSTRACT

This study evaluated the impact of climate change on the biogeographic patterns of habitat suitability for *Dodonaea viscosa*. This research is the first to report the potential effect of climate change on the distribution of *D. viscosa* at regional and global scales. From a global perspective, the greatest potential habitat loss was observed in Australia. At a regional scale in México, the greatest contraction was observed in the state of Chihuahua. We analyzed the influence of climate, solar radiation, and topography on its distribution under global and regional scenarios. Additionally, we identified areas at risk of potential change and refugia. We considered 34 environmental variables organized into three main categories: climate, solar radiation, and topography. Consistent with our findings, the models identified climate as the primary factor of habitat suitability. The most influential variables were minimum temperature of the coldest month, solar radiation, precipitation of the driest month, and annual precipitation. *D. viscosa* showed a positive response to global warming, manifested in an increase in population size; however, projections for México are unfavorable, showing habitat suitability loss exceeding 70% in the arid regions of Chihuahua. The species is expected to redistribute to higher-altitude areas in the southwestern United States. These studies enable specialists to design habitat suitability maps that incorporate crucial ecological features for specific areas, track migration patterns, monitor population changes, and understand interactions with suitable habitats.

Keywords: habitat suitability, environmental variables, Maxent, refuge areas, migration pater.

RESUMEN

Este estudio evaluó el impacto del cambio climático en los patrones biogeográficos de idoneidad del hábitat para *Dodonaea viscosa*. Esta investigación es la primera en reportar el efecto potencial del cambio climático sobre distribución de *D. viscosa* a nivel regional y mundial. Desde una perspectiva global, la mayor pérdida potencial de hábitat se observó en Australia. Y a escala regional, en México, la mayor contracción se observó en el estado de Chihuahua. Analizamos la influencia del clima, la radiación solar y la topografía en su distribución bajo escenarios globales y regionales. Además, identificamos áreas de riesgo de cambio potencial y de refugio. Consideramos 34 variables ambientales organizadas en tres categorías principales: Clima, Radiación solar y Topografía. Según nuestros hallazgos, los modelos identificaron el clima como el principal factor de idoneidad del hábitat. Las variables más influyentes fueron la temperatura mínima del mes más frío, radiación solar, precipitación del mes más seco y precipitación anual. *D. viscosa* mostró una respuesta positiva al calentamiento global manifestada en un incremento en el tamaño de sus poblaciones; sin embargo, las proyecciones para México son desfavorables, presentando pérdida de idoneidad del hábitat superior al 70% en las regiones áridas de Chihuahua. Se espera que la especie se redistribuya en zonas de mayor altitud hacia el suroeste de Estados Unidos. Estos estudios permiten a especialistas, diseñar mapas de idoneidad de hábitat que incorporan características ecológicas cruciales para áreas específicas. Además, permite rastrear patrones de migración, monitorear cambios de población y comprender las interacciones con hábitats adecuados.

Palabras clave: idoneidad de hábitat, variables ambientales, Maxent, áreas de refugio, patrones de migración.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se asocia principalmente con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de actividades antropógenas derivadas de la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo en la cobertura de la tierra y residuos (IPCC, 2007). En ese sentido, el cambio climático está provocando modificaciones ambientales regionales y globales en temperatura y precipitación (Martín-Murillo et al., 2018). Además, está afectando la distribución de las especies a nivel mundial. En las plantas, estos cambios se observan en la distribución y abundancia de las especies, en la fenología, la floración y la fructificación (Chen et al., 2019), así como en la disponibilidad de arbustos como fuente de alimento para especies de animales silvestres. Asimismo, dificulta la germinación de semillas de cultivos agrícolas, de especies forestales y otras especies silvestres; así como influir negativamente en procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración, las relaciones hídricas y la estabilidad de las membranas celulares (Zahang et al., 2009). En este contexto, el cambio climático afecta la contracción y expansión de los rangos geográficos de distribución de especies vegetales, alterando la estructura y dinámica de las comunidades (Rodríguez-Craverio et al., 2017). Por lo tanto, entender los impactos del cambio climático en la biodiversidad vegetal es crucial para conservar y restaurar espacios naturales y asegurar un futuro viable en este mundo cambiante.

Kimbal (2016) simuló las respuestas fisiológicas de diversos cultivos, entre ellos arroz, trigo, soya, papa, algodón, maíz y sorgo, bajo condiciones elevadas de dióxido de carbono (CO₂) y altas temperaturas, destacando que las simulaciones de cambio climático impactaron negativamente a las plantas C3 y C4. Los cambios incluían el cierre estomático con una reducción en la tasa de evapotranspiración, incremento en la temperatura del dosel alrededor de 0,7° C y aumento en la biomasa. Además de las tolerancias fisiológicas, el cambio climático se encuentra relacionado con la pérdida de idoneidad del hábitat y, por lo tanto, algunas especies han modificado sus rangos geográficos como una estrategia de adaptación o enfrentar la desaparición (Rubenstein et al., 2023). El aumento de las temperaturas y las condiciones de sequía pueden afectar las interacciones competitivas entre algunas especies vegetales lo que podría provocar reducciones y/o expansiones de hábitats adecuados, así como a la formación de rutas de dispersión que permitan a las especies seguir los desplazamientos asociados al cambio climático. En las últimas décadas, diversos estudios han concluido que el cambio climático ha afectado negativamente la idoneidad del hábitat de múltiples especies, alterando su distribución y dinámica poblacional (Albuquerque et al., 2020). Por su parte, Kelly y Goulden (2008) informaron en su investigación que, durante un periodo de 30 años, diversas especies de plantas como *Encelia farinosa*, *Ambrosia dumosa*, *Larrea tridentata*, *Quercus corneilius-mulleri*, *Perplexans*, *Abies concolor*, *Pinus jeffreyi* y

Rhus ovata migraron en promedio 65 metros en elevación en el sur de California. Este desplazamiento altitudinal estuvo asociado con el aumento de la temperatura superficial, inviernos más cálidos y una reducción del manto de nieve, evidenciando cómo el cambio climático puede modificar la distribución de la vegetación en zonas montañosas.

En este trabajo, investigamos los impactos del cambio climático sobre la idoneidad del hábitat de *Dodonaea viscosa* Jacq., una planta de alto valor en la medicina tradicional. Es conocida por distintos nombres comunes, tales como *chapulixtle*, *jarilla*, *hierba de la cucaracha*, *cuerno de cabra*, *granadina*, *aria*, *munditos* o *varal y huesito*. Estudios recientes han demostrado que *D. viscosa* contiene compuestos bioactivos con propiedades terapéuticas, utilizados para el tratamiento de diversas afectaciones humanas, entre ellas postparto, gota y efectos antiinflamatorios. También, se ha utilizado como agente hipoglucémico, citotóxico y anticancerígeno, además, se ha reportado que tiene actividad biológica contra algunas plagas agrícolas (Pérez-Mayorga et al., 2022). *Dodonaea viscosa* es un arbusto perenne perteneciente a la familia Sapindaceae, con una distribución pantropical que abarca regiones tropicales y subtropicales del mundo, independientemente de la latitud, lo cual incluye las zonas más cálidas de América del Norte, Asia del Sur y el sur de África (Muhammad et al., 2016). En México, *D. viscosa* se encuentra en todos los estados de la República excepto en Tabasco (Calderón de Rzedowski & Rzedowski, 2006). Esta planta está asociada con bosques perturbados, vegetación mesófila, así como en los bordes de arroyos, barrancos y pendientes, claros forestales, lugares expuestos a la radiación solar, pastizales y terrenos deteriorados y erosionados. Si bien, existen estudios que han documentado la importancia y los servicios ecológicos que proporciona *D. viscosa* (Camacho et al., 2003); los impactos del cambio climático sobre su distribución y la idoneidad de sus hábitats aún no han sido completamente comprendidos. Por lo tanto, analizar los cambios en la idoneidad del hábitat bajo distintos escenarios climáticos para especies cosmopolitas, resulta crucial para identificar patrones de distribución, áreas de vulnerabilidad y posibles zonas refugio, lo cual es fundamental para establecer estrategias eficaces de manejo forestal y aprovechamiento sustentable, debido a que se han reconocido importantes usos de la especie y de sus extractos como aplicaciones biomédicas, bioprotectores y bioestimulantes de cultivos (Pérez-Mayorga et al., 2022). El estudio de esta especie no solo permite generar conocimiento útil para la conservación, sino también para el manejo de ecosistemas tropicales y subtropicales, lo cual no siempre es posible con especies menos resilientes al cambio climático e identificar áreas con mayor probabilidad de transformación ecológica.

Este estudio tiene como objetivos (1) evaluar los patrones biogeográficos de idoneidad del hábitat de *Dodonaea viscosa*; (2) determinar la influencia del clima, la radiación solar y la topografía en su distribución; (3) analizar la influencia del cambio climático en la idoneidad del há-

bitat a dos escalas diferentes (global y regional); (4) identificar las áreas con mayor riesgo de cambio; (5) localizar áreas de refugio potenciales para futuras poblaciones. Para lograr estos objetivos, se hace uso de modelos de distribución de especies (SDM, por sus siglas en inglés) para asociar variables ambientales con registros de presencia de la especie, asumiendo que el clima es uno de los factores cruciales en la distribución de las especies. Los SDM son herramientas ampliamente utilizadas para modelar la idoneidad del hábitat actual y futuro de diferentes especies y ecosistemas, así como para apoyar estrategias de la gestión de la biodiversidad bajo diferentes escenarios climáticos.

MÉTODOS

Preparación de datos: Ocurrencias. Descargamos 54.400 registros de ocurrencias de *D. viscosa* del Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2023). Su distribución nativa incluía áreas tropicales y subtropicales alrededor del mundo (Figura 1A). Debido a que la mayoría de estos datos no se recopilaban para modelar la distribución de especies, aplicamos tres pasos para mitigar el sesgo potencial de los datos: (1) eliminamos registros duplicados, lo cual es importante para evitar la sobre predicción; (2) Georreferenciación: eliminamos todos los datos sin coordenadas; (3) Sesgo de muestreo: submuestreamos aleatoriamente los registros de ocurrencia. Para reducir los puntos de ocurrencia agregados espacialmente (autocorrelación espacial) y la sobrerepresentación (múltiples puntos en la misma área), se construyó un sistema de celdas de cuadrícula con el mismo tamaño que las variables ambientales utilizadas en este estudio (alrededor de 5 minutos) con selección aleatoria de un registro dentro de cada celda de cuadrícula (Guisan et al., 2000). Después del proceso de limpieza, utilizamos 18.658 ocurrencias. También creamos dos grupos: entrenamiento (80% de los puntos de ocurrencia) y prueba (20% de los puntos de ocurrencia).

Pseudo-ausencias. Debido a que el conjunto de datos solo incluía ocurrencias, generamos 10.000 puntos de fondo, conocidos como datos de pseudo-ausencia, para ayudar a caracterizar el rango de características ambientales del área de estudio. Los datos de fondo se utilizan a menudo en ejercicios de modelado de distribución de especies porque los datos aún necesitan ser ampliados para la mayoría de las especies y regiones en todo el mundo, y los conjuntos de datos que incluyen presencia y ausencia son raros (Phillips et al., 2006). Incluso cuando están disponibles, los datos de ausencia real pueden estar sesgados e incompletos.

Datos ambientales. Se consideraron 34 variables ambientales, organizadas en tres categorías: (1) Clima: obtuvimos 19 variables bioclimáticas de WorldClim. Las variables bioclimáticas se construyen a partir de medidas de temperatura y precipitación y representan tendencias anuales, estacionalidad y factores limitantes. (2) Radiación solar:

proviene de simulaciones atmosféricas independientes, y se expresa como un flujo energético (kJ m^{-2} por día), para este estudio obtuvimos medidas mensuales de radiación solar ($\text{kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) de WorldClim (Fick & Hijmans, 2017), también utilizamos los valores mensuales para estimar las cinco medidas: máxima, mínima, media, mediana y desviación estándar. (3) Topografía: descargamos diez medidas de variación topográfica del conjunto de datos EarthEnv (Amatulli et al., 2018). Estas representan la media y la desviación estándar de elevación, rugosidad, pendiente, índice de posición topográfica e índice de rugosidad del terreno.

También obtuvimos ocho datos climáticos futuros de global climate models (GCM), cada GCM incluye las mismas 19 variables bioclimáticas de WorldClim (Fick & Hijmans, 2017): BCC-CSM2-MR, CRM-CM6-, CNRM-ESM2-1, CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MIROC6, MRI-ESM2-0. Los datos representan medidas de la Fase 6 del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP por sus siglas en inglés), este proyecto es una colaboración internacional organizada por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas para mejorar y comparar modelos climáticos globales y están disponibles para cuatro Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs): 126, 245, 370 y 585. Los SSP representan escenarios prospectivos que integran trayectorias socioeconómicas con proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero. En particular SSPs126, describe un escenario de desarrollo sostenible con bajas emisiones; SSPs245, representa un camino intermedio con emisiones moderadas; SSPs370, asociado a un mundo con alta rivalidad regional y elevadas emisiones; y SSPs585, proyecta un desarrollo económico acelerado basado en el uso intensivo de combustibles fósiles, resultando en emisiones muy altas (O'Neill et al., 2017). Cada SSP permite explorar diferentes combinaciones de desafíos y oportunidades para la mitigación y adaptación al cambio climático (O'Neill et al., 2017).

Ajuste y evaluación del modelo. Se utilizó el modelo Maxent para comprender cómo el clima, la radiación solar y la topografía se correlacionan con sus ocurrencias y predecir la distribución actual y futura. Maxent (Maximum Entropy Modeling) es un algoritmo de aprendizaje de máquina que estima la distribución potencial de una especie utilizando únicamente datos de presencia y variables ambientales. Basado en el principio de máxima entropía permite estimar la probabilidad de presencia y el rango geográfico de una especie (Phillips et al., 2006). Debido a sus resultados exitosos, Maxent se ha empleado ampliamente para modelar la distribución de especies y estimar rangos geográficos.

Antes de iniciar el proceso de modelado, usamos técnicas de selección de variables para identificar aquellas con mayor influencia. En concreto, aplicamos la función varSel (Vignali et al., 2020) y el paquete SDMTune para identificar las variables menos correlacionadas. Esta función itera todas las variables e identifica aquellas con la mayor contribución al modelo. Si se detecta una corre-

lación, la función varSel realiza una prueba Jackknife y elimina aquellas que no degradan el rendimiento del modelo una vez eliminadas. Se usó el conjunto de datos de entrenamiento y las variables ambientales seleccionadas para modelar la distribución de *D. viscosa* alrededor de su área de distribución nativa. Para evaluar el desempeño predictivo del modelo, se empleó el área bajo la curva (AUC), las estadísticas de quietud verdadera (TSS) y el conjunto de datos de prueba para evaluar su rendimiento predictivo. Ambos métodos se utilizan y se aceptan a menudo para evaluar la calidad de una predicción. Los valores altos de AUC y TSS indican una superposición de áreas de alta idoneidad y registros reales de presencia, en la mayoría de los casos, representadas por un conjunto de datos independiente (conjunto de datos de prueba). El valor de 0,5 significa que el modelo es tan bueno como una deducción aleatoria (Phillips et al., 2006). Aplicamos el método de sensibilidad máxima de entrenamiento más umbral de especificidad para transformar la idoneidad prevista en presencias y ausencias. El método de sensibilidad-especificidad ha predicho con éxito presencias/ausencias a partir de valores de idoneidad.

La influencia del cambio climático. Se empleó el modelo Maxent, obtenido del conjunto de datos de entrenamiento, y los ocho modelos de circulación global para evaluar el impacto del cambio climático en la distribución de *D. viscosa* de los cuatro SSP. Para ello, modelamos la distribución prevista para cada GCM y SSP. Posteriormente, superpusimos todos los mapas previstos y consideramos el 100% de concordancia como una presencia prevista. También comparamos el mapa final previsto a la distribución actual estimada para identificar áreas donde es probable que la especie desaparezca (contracción), se expanda (expansión), no tenga cambios adecuados en el pasado y el futuro (refugio) y no sea adecuada. Los resultados de este estudio presentan la distribución a partir de los cuatro escenarios de cambio climático en dos escalas: a nivel global, incluye áreas donde la especie podrá estar presente en otros lugares del mundo y para México incluye áreas en otras regiones en donde ahora no está presente.

RESULTADOS

El proceso de selección de variables basado en los datos redujo el número de variables a nueve. Estas incluyeron precipitación anual, precipitación del trimestre más seco, rango diurno medio (definido por la media de la diferencia mensual entre temperatura máxima y mínima), temperatura máxima del mes más cálido, temperatura mínima del mes más frío, elevación (media), radiación solar (máxima), índice de posición topográfica e índice de rugosidad del terreno. Las predicciones derivadas de Maxent fueron en general, precisas, el resultado del proceso de evaluación del modelo obtuvo un rendimiento de AUC (0,96) y TSS (0,79). Los resultados que se presentan

a continuación se basan en modelos con el conjunto de datos de entrenamiento y las variables seleccionadas. El patrón biogeográfico de idoneidad del hábitat mostró alta concentración de la especie en áreas tropicales y subtropicales, especialmente en el sur de Australia, el sur de Sudáfrica, el sur de Brasil, Uruguay, el noreste de África, el centro-norte de México, el sur de Estados Unidos y partes de la cuenca mediterránea (Figura 1A). Del mismo modo, se evidenció un patrón semejante en la presencia estimada, lo que indica una tendencia consistente en los distintos escenarios analizados (Figura 1B).

Las simulaciones de Maxent identificaron a las variables climáticas como el principal impulsor de la distribución de *D. viscosa*. El proceso de importancia de las variables identificó a la temperatura mínima del mes más frío como la más influyente (Figura 2), seguida por la radiación solar máxima. La tercera y cuarta más importantes fueron la precipitación anual y la temperatura máxima del mes más cálido. Por otro lado, la topografía fue, en general, el componente menos importante (Figura 2). Sin embargo, la respuesta de las variables no fue lineal (Figura 3). La probabilidad de presencia, también denominada idoneidad del hábitat, fue baja en áreas con temperaturas mínimas negativas y alcanzó su máximo cuando las temperaturas mínimas del mes más frío alcanzaron los 8 °C (Figura 3A). De manera similar, la probabilidad de ocurrencia fue baja en áreas de baja radiación solar máxima (Figura 3B).

Los valores aumentaron abruptamente en áreas cercanas a 20.000 (kJ m⁻² día⁻¹), posteriormente disminuyó cuando el valor superó los 27.000 (kJ m⁻² día⁻¹). Asimismo, se observó una alta probabilidad de presencia con niveles bajos de precipitación durante el trimestre más seco, por el contrario, disminuyó significativamente a medida que la precipitación aumentó (Figura 3C).

Los análisis del cambio climático identificaron una tendencia negativa en las cuatro Vías Socioeconómicas Compartidas. Los modelos revelaron una pérdida potencial significativa de la idoneidad del hábitat en todos los escenarios (Contracción, Figura 4A). Los valores variaron de 24,86% (SSP126) a 60,98% (SSP 585). La distribución geográfica de la contracción del rango de distribución de las especies muestra una pérdida significativa en Oceanía, América del Norte, África y América del Sur (Figura 4A). El modelo también indica áreas donde las especies pueden obtener nuevos hábitats (Expansión del rango, Figura 4A). Considerando solo a México y áreas circundantes, los resultados fueron aún más preocupantes ya que se proyectó que una porción significativa de los hábitats adecuados desaparecerá, especialmente en el escenario SSP 585 (72,4%). Se esperan pérdidas significativas en las zonas áridas y semiáridas (desiertos de Sonora y Chihuahua), Sierra Madre Occidental, la porción oriental de la Sierra Madre Oriental, áreas del sur del Altiplano Mexicano y la porción oriental de la península de Yucatán. También se esperan expansiones, especialmente en el Altiplano Mexicano y la Sierra Madre Oriental (Figura 4B).

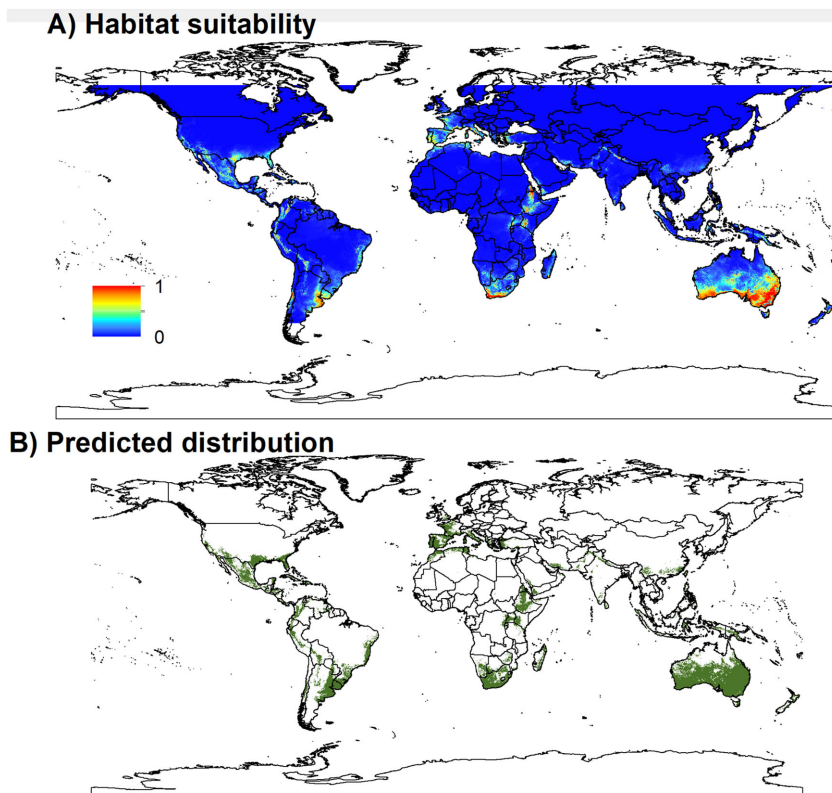


Figura 1. Distribución geográfica de la idoneidad del hábitat (A) y rango geográfico de *Dodonaea viscosa* (B)
 Geographic distribution of habitat suitability (A) and geographic range of *Dodonaea viscosa*. (B)

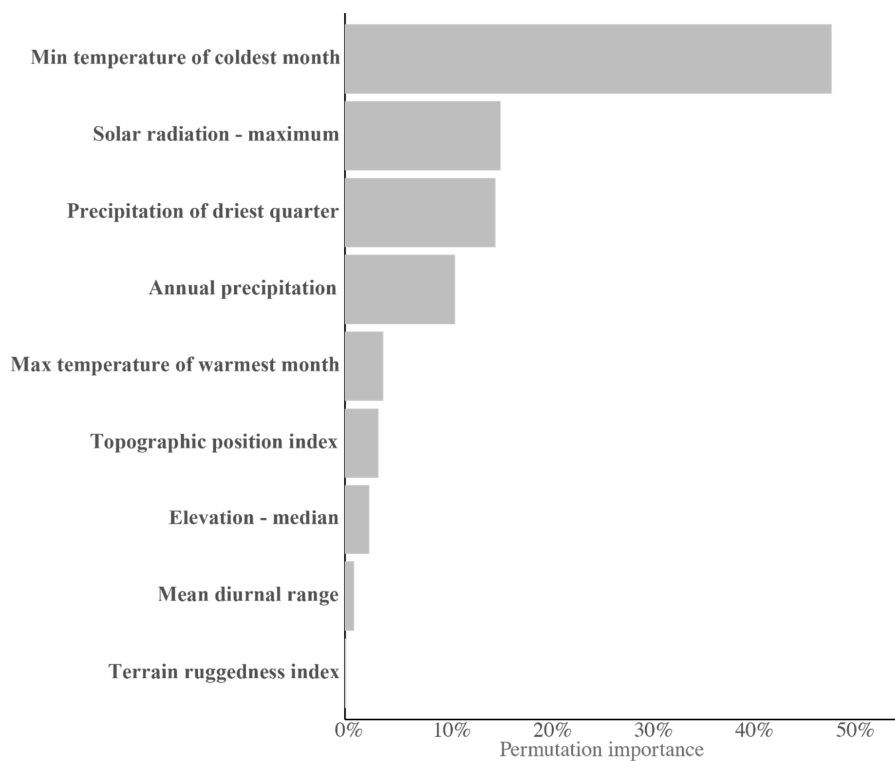


Figura 2. Importancia de permutación ordenada de las variables más influyentes utilizadas en el modelo Maxent.
 Ordered permutation importance of the most influential variables used in the Maxent model.

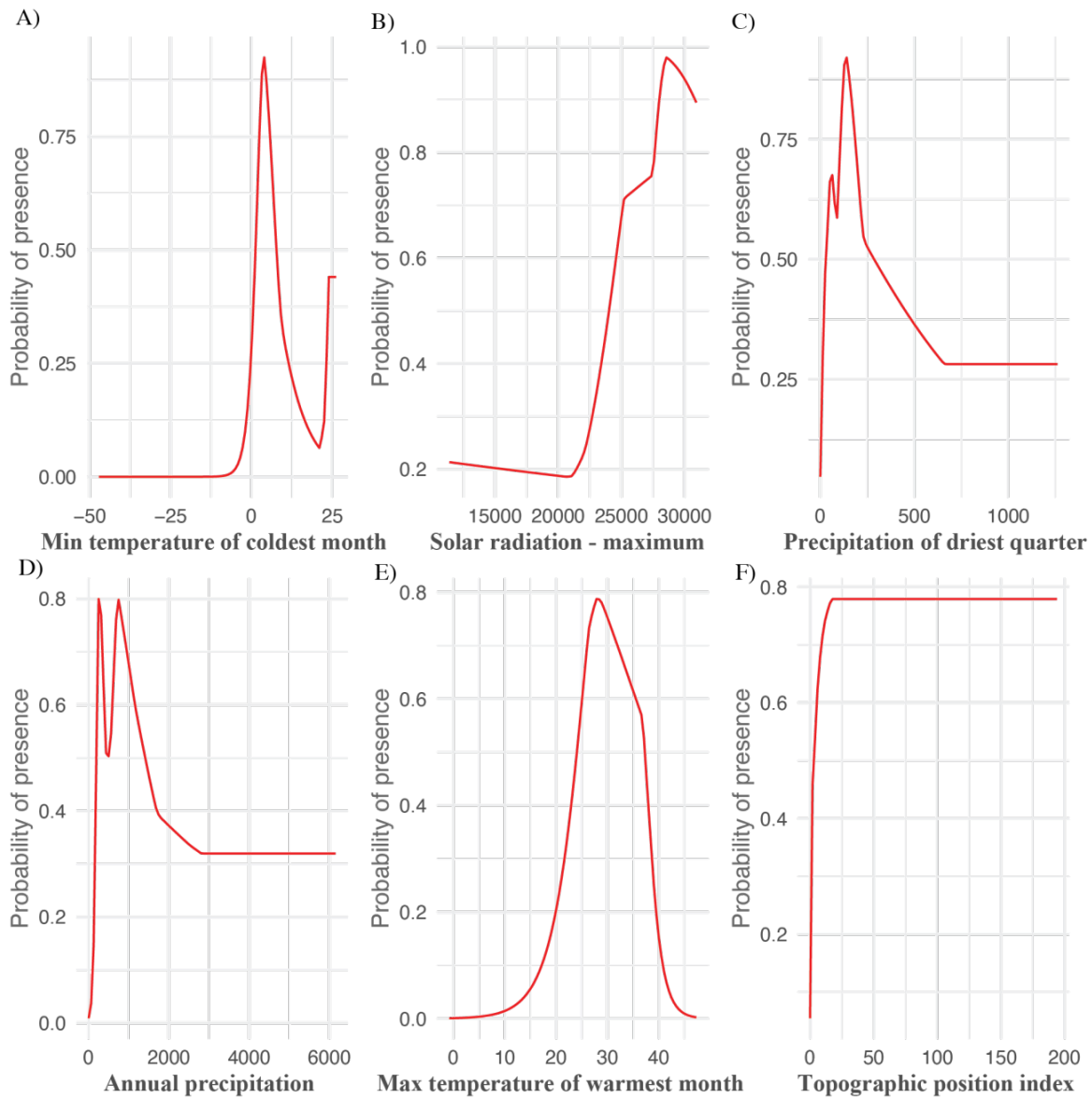


Figura 3. Gráficos de dependencia parcial de las variables más influyentes utilizadas en el modelo Maxent.

Partial dependence plots of the most influential variables used in the Maxent model.

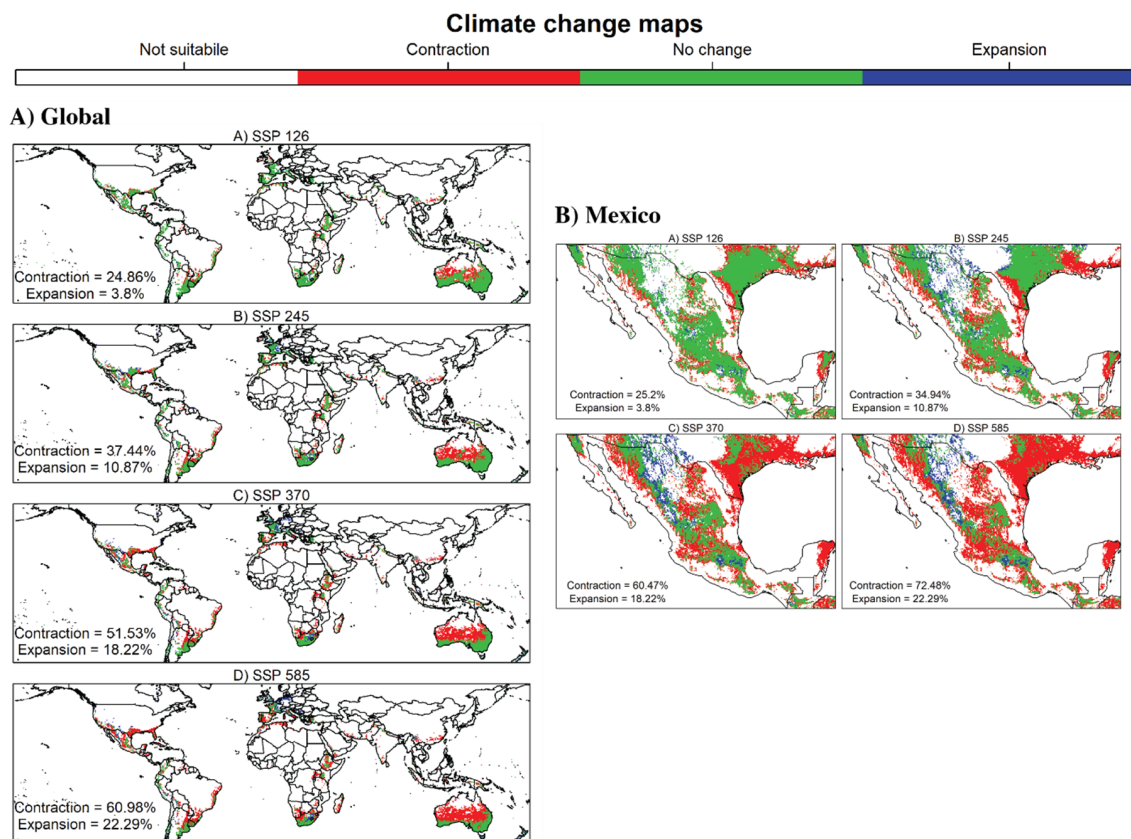


Figura 4. Distribución espacial de las áreas proyectadas con pérdida (contracción) y ganancia (expansión) de idoneidad de hábitat. También se muestran las localidades sin cambios (refugio) y aquellas inadecuadas tanto en el presente como en el futuro. Los mapas presentan la información en dos escalas: global (A) y México y sus alrededores (B).

Spatial distribution of areas projected to loss (contraction) and gain (expansion) of habitat suitability. Locations with no change (refuge) and that are unsuitable in the current or future are also displayed. Maps display the influence at two scales: global (A) and México and surroundings (B).

DISCUSIÓN

En este trabajo investigamos la influencia de las variables ambientales en la idoneidad del hábitat de *D. viscosa*, y proyectamos el cambio en la idoneidad del hábitat bajo el incremento de la temperatura a dos escalas, global y para México. Estudios previos han demostrado que *D. viscosa* tiene una distribución espacial muy variable; puede habitar desde el nivel del mar hasta los 3.600 m s.n.m. (Liu, 2003). Además, *D. viscosa* crece en una amplia variedad de suelos, incluyendo superficiales, rocosos y con pendientes suaves a pronunciadas. Incluso, tiene la capacidad de crecer en suelos degradados, así como adaptarse a condiciones drásticas de sequía, frío, pedregosidad, suelos erosionados por procesos naturales o actividades humanas como la labranza (Camacho et al., 2003). De acuerdo con la literatura, somos los primeros en demostrar que la idoneidad del hábitat de *D. viscosa* está fuertemente relacionada con cuatro variables climáticas, las cuales determinan su distribución geográfica.

Nuestros resultados identifican áreas de alta idoneidad en bioclimas tropicales y subtropicales, particularmente en

el sur de Australia, sur de Sudáfrica, sur de Brasil, Uruguay, noreste de África, centro-norte de México, sur de Estados Unidos y partes de la cuenca mediterránea. Este patrón está relacionado principalmente con la temperatura mínima del mes más frío. La probabilidad de ocurrencia fue menor a bajas temperaturas 2° C y aumentó significativamente a temperaturas mayores de 6 °C y disminuyendo considerablemente a los 8 °C. En ese sentido, la temperatura es una de las principales variables que determinan la distribución y productividad de las plantas, con efecto sobre la actividad fisiológica en todas las escalas temporales y espaciales. En este contexto, las plantas están adaptadas a temperaturas entre 5 °C y 40 °C, dentro del cual ocurre la producción de biomasa y el crecimiento vegetal (Yepes & Silveira, 2011).

Los resultados también muestran que la radiación solar influyó fuertemente en la idoneidad del hábitat de *D. viscosa*; ya que la idoneidad del hábitat aumentó drásticamente a partir de 20.000 (kJ m⁻² día⁻¹), alcanzando su valor máximo en torno a los 27.000 (kJ m⁻² día⁻¹), no obstante, al superar este umbral de radiación, la idoneidad del hábitat comenzó a disminuir, lo que indica una tolerancia limitada de la especie a niveles excesivos de radiación. Los resulta-

dos obtenidos concuerdan con los hallazgos de Camacho et al. (1993), quienes también señalan que *Dodonaea viscosa* se encuentra en sitios con alta exposición solar, como aquellos bosques con escasa cobertura arbórea, usualmente afectada por incendios. En consecuencia, la presencia de la especie ocurre de forma abundante en estas condiciones; esto coincide con su carácter de especie pionera, ya que *D. viscosa* actúa como colonizadora de ambientes perturbados, estableciéndose rápidamente gracias a su tolerancia a condiciones adversas como la sequía y la alta radiación solar. Además, la radiación solar desempeña un papel importante en la germinación de *D. viscosa*, observándose una gran cantidad de plántulas en áreas descubiertas de vegetación. Por otro lado, se ha reportado que estimula la producción de compuestos bioactivos como flavonoides y fenoles (Al-Rajab, 2021). En relación con esto, el color verde intenso de las plantas de *D. viscosa* indica que la especie presenta una alta efectividad a la intensidad de la radiación solar, en respuesta al espectro de luz conocido como Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, por sus siglas en inglés). Asimismo, los períodos de floración están determinados por el tiempo de exposición a la luz (Al-Rajab, 2021). En tal sentido, la radiación solar también es importante para la germinación y la calidad de las semillas (Al-Rajab, 2021). Por su parte, El-Sayed et al. (2022) destacan en su estudio un aumento en la germinación de *D. viscosa* cuando se expone a la radiación de rayos gamma. Estos efectos pueden explicarse por la activación de la síntesis de proteínas que ocurre en las primeras etapas de la germinación (Araujo et al., 2016). Asimismo, la radiación estimula la producción de hormonas y activa enzimas clave involucradas en los procesos germinativos. Además, contribuye a mejorar la germinación al acelerar la división celular en los tejidos meristemáticos (Katiyar et al., 2022).

Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia aumentó a medida que disminuía la precipitación en el mes más seco, alcanzando un incremento abrupto alrededor de los 150 mm, seguido de una notable reducción. De acuerdo con los resultados, la variable precipitación anual influyó en la idoneidad del hábitat, aumentando considerablemente en picos entre precipitaciones de 200 mm y 800 mm. Nuestros resultados concuerdan con lo mencionado por Camacho et al. (1993), quienes reportan precipitaciones similares para la especie, además, de requerir una estación seca bien definida. Por otro lado, los factores climáticos precipitación y temperatura, son las variables que determinan los patrones de distribución de las especies y, a su vez, regulan esencialmente la biodiversidad (Michaletz et al., 2018). Desde esta perspectiva, la precipitación es una de las variables bioclimáticas más importantes, ya que mejora el rendimiento de los productos agrícolas y al mismo tiempo contribuye a inundaciones, sequías severas y desastrosas (Zahang, 2009). Se ha demostrado que las plantas bajo estrés hídrico modifican la longitud y biomasa de sus raíces, incrementando el desarrollo de pelos radiculares, permitiendo una mayor superficie de contacto con el suelo,

y, por ende, un mejor aprovechamiento del agua. Asimismo, las plantas en respuesta, aumentan la proporción de asimilados a las raíces, lo que incrementa y favorece su crecimiento (Huang & Fry, 1998). La idoneidad del hábitat de *D. viscosa* estuvo estrechamente relacionada con la precipitación del mes más seco. Afzal et al. (2017) reportan a *D. viscosa* como una especie tolerante a la sequía con mayor resiliencia a condiciones ambientales adversas. En relación con esto, la especie presenta mecanismos de adaptación en respuesta al estrés ambiental, como una disminución en su tasa fotosintética neta (Li et al., 2017). Además, muestra una secuencia característica de rasgos adaptativos que permiten limitar el daño tisular, es decir, el deterioro de estructuras internas de órganos tales como hojas, tallos y raíces. Esta secuencia comienza con el marchitamiento controlado, una respuesta que reduce la pérdida de agua al disminuir la turgencia celular, y continúa con la formación de embolias sustanciales en el tallo (Wang et al., 2021).

Según nuestro modelo, el índice de exposición topográfica no mostró influencia en la idoneidad del hábitat para *D. viscosa*; es decir, se mantuvo estable en todo el rango considerado. Por tanto, el patrón de distribución de *D. viscosa* no está controlado por ninguno de los factores topográficos: elevación, orientación y pendiente. Por otro lado, las condiciones edáficas no parecen ser determinantes en su distribución espacial, ya que *D. viscosa* muestra una alta plasticidad ecológica para adaptarse a diferentes condiciones de suelo, lo que le permite habitar una amplia gama de ambientes (Liu et al., 2022). Esta adaptabilidad se refleja en su extensa distribución geográfica, que abarca desde los 44° de latitud sur hasta los 33° de latitud norte (Liu, 2003).

El impacto potencial del cambio climático en la distribución de Dodonaea viscosa. Nuestro estudio es el primero en informar el efecto potencial del cambio climático en la distribución de *Dodonaea viscosa* en múltiples extensiones. Desde una perspectiva global, la mayor parte de la pérdida potencial de hábitat se observó en Australia. Se han reportado los impactos del cambio climático en la distribución de *D. viscosa* dentro de la región del Geosinclinal de Adelaida, en el sur de Australia. Los cambios incluyen la morfología de la especie a través del análisis de gradientes espaciales (Guerin et al., 2012). De acuerdo con Baruch et al. (2018), la variación en los rasgos funcionales de *D. viscosa* es probablemente el resultado de la aclimatación ambiental en lugar de la adaptación o la diferenciación genética; esta especie exhibe una capacidad adaptativa para aclimatación al cambio climático *in situ*; es decir, presenta capacidad de aclimatación funcional que le permite mantener su desempeño fisiológico sin necesidad de depender de cambios genéticos a largo plazo.

Los resultados también indicaron una pérdida significativa de hábitat adecuado en América del Norte, especialmente en el suroeste de los Estados Unidos y el norte de México. Estudios previos (Albuquerque et al., 2020) en esta área predicen un impacto significativo del cambio

climático en la idoneidad de los hábitats de plantas nativas y exóticas, especialmente en el escenario de cambio climático en condiciones más drásticas. Nuestros hallazgos coinciden con lo anterior, ya que la pérdida de hábitat de *D. viscosa* también se observa en el SSP 585 (escenario menos optimista, Figura 4D). La pérdida es aún más notoria en áreas de mayor altitud en Chihuahua (México) y en climas más fríos del suroeste de Estados Unidos, donde predomina un clima seco o árido con vegetación principalmente de matorral.

Las proyecciones negativas observadas en el presente estudio podrían estar relacionadas con el aumento de las temperaturas debido al calentamiento global, lo cual ocasiona que varias especies desplacen sus rangos geográficos hacia latitudes más cercanas a los polos o hacia mayores elevaciones (Freeman et al., 2018). Por lo tanto, nuestros resultados muestran un cambio potencial en el patrón de idoneidad del hábitat de *D. viscosa*, hacia rangos altitudinales fríos. Sin embargo, este cambio puede afectar negativamente el establecimiento y crecimiento a futuro de *D. viscosa*, debido a que los microorganismos del suelo son una parte esencial del establecimiento exitoso de esta especie; es decir, a pesar de que la especie responde positivamente a un incremento en la temperatura no mayor a 30 °C, y estas respuestas positivas dependen de los microorganismos de la rizosfera (Wang et al., 2018), lo que indica que los microorganismos del suelo impulsan las respuestas de las plantas al cambio de temperatura. Sin embargo, las predicciones pronostican escenarios de migración de la especie debido al calentamiento global hacia regiones con menor temperatura; lo cual no resulta idóneo para *D. viscosa*. De acuerdo con las proyecciones, se estima que, a mayor altitud, más frío será el clima en el futuro, por lo tanto, el crecimiento de *D. viscosa* puede verse limitado en estas condiciones. La expansión de *D. viscosa* se proyectará en la zona bioclimática de la Sierra Madre Oriental, en el estado de Coahuila, hacia matorrales xerófilos ya que es el bioma más grande en esta área geográfica, cubriendo 41,3% de la superficie de la Sierra Madre Oriental (Freeman et al., 2018).

Destacamos que nuestro estudio es limitado, debido a que en nuestros modelos solo incorporaron predictores extrínsecos de la distribución de las plantas. Si bien, el clima y la topografía son fundamentales para determinar la distribución de las especies, cabe señalar que los factores intrínsecos (i.e., interacciones entre especies, plasticidad) también juegan un papel crucial en la distribución de las plantas y la adaptación a condiciones adversas (Baruch et al., 2018). Por su parte, Xu et al. (2022) demostraron que *D. viscosa* presenta una combinación de estrategias de evasión y tolerancia al estrés hídrico. En este sentido, la capacidad de adaptación de las plantas para enfrentar dicho estrés implica una serie de mecanismos correlacionados entre estrategias orientadas a limitar o tolerar sus efectos, los cuales pueden interactuar de manera sinérgica o antagónica y dar lugar a cambios fenotípicos que modulan la expresión del genotipo. Estas respuestas pueden manifestarse a

nivel fisiológico y morfológico. En este sentido, *Dodonaea viscosa* lleva a cabo una serie de modificaciones fisiológicas en respuesta a la sequía, independientemente de las diferencias en su clima de origen. Un estudio reciente de Xu et al. (2022) destaca que *Dodonaea viscosa* reduce su conductancia estomática entre -0,5 y -0,7 MPa y, en condiciones más severas, alrededor de -1,2 MPa. Además, experimenta una reducción del 50 % en su potencial de conductancia hidráulica, lo que indica una alta sensibilidad al déficit hídrico. Por lo tanto, las transformaciones climáticas y edáficas han desencadenado procesos adaptativos en las comunidades biológicas, promoviendo su evolución, desarrollo, diversificación, dispersión o, en algunos casos, extinción a lo largo del tiempo (Xu et al., 2022)

Implicación para la conservación de la especie. *Dodonaea viscosa* es una especie que brinda diversos servicios ecosistémicos tales como captura de carbono, recarga hídrica y evita la erosión. Se ha demostrado que la forestación con *D. viscosa* aumenta significativamente el contenido de nutrientes del suelo y rehabilita eficazmente los ecosistemas degradados (Wang et al., 2021). Además, a la especie se le reconocen diversos usos con gran potencial de aprovechamiento de su biomasa; los tallos por su dureza son empleados de diversa manera y a sus extractos, principalmente foliares, se le atribuyen potencial biomédico y como bioestimulante y bioprotector de cultivos agrícolas (Pérez-Mayorga et al., 2022; Espinoza-Antón et al., 2025) Aunque *Dodonaea viscosa* posee una notable capacidad de adaptación, su plasticidad fenotípica tiene límites, ya que las condiciones climáticas extremas o prolongadas pueden superar sus mecanismos fisiológicos. Nuestro estudio sugiere que *D. viscosa* a pesar de poder adaptarse a temperaturas más altas y una mayor estacionalidad bajo escenarios de cambio climático, su plasticidad tiene un límite ante estos parámetros. En consecuencia, se esperan cambios significativos para el año 2050, que afectarán los medios de vida de las comunidades que dependen de estos servicios, lo que conducirá a una disminución de los beneficios ambientales proporcionados por la especie. Además, el ritmo acelerado del cambio climático puede exceder la velocidad con la que *D. viscosa* logra aclimatarse, lo que pone en riesgo su distribución y establecimiento. Una de las ventajas significativas de las proyecciones cartográficas radica en su capacidad para representar visualmente hábitats adecuados para especies específicas. Estos mapas brindan a los conservacionistas una visión integral de la distribución potencial de la especie, lo que facilita la identificación de áreas críticas que requieren atención inmediata y esfuerzos de conservación, lo que permite tomar decisiones informadas con respecto a la asignación de recursos en dependencia de los requerimientos de la especie.

Nuestros hallazgos resaltan la importancia de integrar múltiples variables ambientales y escalas geográficas en los modelos de distribución de especies para evaluar los impactos del cambio climático en la biodiversidad. Si bien,

D. viscosa podría beneficiarse del calentamiento global en algunas áreas, la pérdida significativa de hábitat en México subraya la necesidad de estrategias de conservación más efectivas y adaptativas que incluyan la identificación y protección de refugios potenciales. Nuestros resultados también destacan la importancia de monitorear continuamente la idoneidad del hábitat para *D. viscosa*, ya que sus respuestas al cambio climático pueden variar significativamente entre regiones y escalas. Estos estudios son fundamentales para predecir los cambios futuros en la distribución de especies y diseñar estrategias de conservación basadas en el conocimiento científico y las proyecciones climáticas actuales.

CONCLUSIONES

En este estudio investigamos los efectos del cambio climático sobre la idoneidad del hábitat de *Dodonaea viscosa*, utilizando el modelo de máxima entropía MaxEnt para proyectar su distribución potencial global y para México bajo distintos escenarios climáticos. Con base en los resultados obtenidos, concluimos: que el desempeño del algoritmo varía según los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: a menor nivel de emisiones, la contracción del hábitat proyectada es más limitada y por lo tanto una mayor distribución de la especie; en cambio, a mayores emisiones se traducen en escenarios más severos, con una pérdida considerable de áreas adecuadas para la especie. Las variables que mostraron mayor influencia en el modelo fueron: la temperatura mínima del mes más frío, la radiación solar, la precipitación del mes más seco y la precipitación anual. Por lo tanto, *Dodonaea viscosa* mostró una respuesta positiva al calentamiento global particularmente bajo condiciones de mayor radiación y temperaturas elevadas. Sin embargo, existe un límite de tolerancia máximo para temperatura y un mínimo para precipitación, por lo que las proyecciones para México son desfavorables para la misma y se estima una pérdida superior al 70% en la idoneidad del hábitat, especialmente en las regiones áridas de Chihuahua. Ante este panorama, se prevé un desplazamiento de la distribución de la especie hacia áreas de mayor altitud, especialmente en el suroeste de los Estados Unidos, donde podrían encontrarse condiciones más favorables. A escala global, las predicciones indican una contracción aún más significativa en Australia, atribuida al incremento de las temperaturas en esa región. La importancia de este estudio radica en poder proyectar la idoneidad futura del hábitat y anticipar la dirección de los cambios en las zonas de distribución para la especie bajo cuatro escenarios climáticos. Este estudio nos permite desarrollar estrategias de prevención mediante la identificación de las zonas con mayor idoneidad y potencial de expansión. En conclusión, aunque *D. viscosa* puede mostrar cierta capacidad de adaptación al cambio climático, los riesgos asociados con la pérdida de hábitat en algunas regiones son preocupantes y requieren acciones inmediatas para mitigar los impactos del cambio climático; por lo

que se sugiere realizar este tipo de estudios en especies más vulnerables y menos tolerantes al calentamiento global.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Los autores contribuyeron de la siguiente manera: Sonia Pérez Mayorga fue responsable de la escritura del manuscrito, organizando y desarrollando los apartados principales del documento. Eduardo Salcedo Pérez: preparación del borrador inicial, realización del proyecto, propuso la idea del proyecto y participó activamente en la redacción y revisión crítica del manuscrito. Fabio Suzart de Albuquerque: escritura, redacción y preparación del borrador inicial, análisis formal, diseño de programas informáticos, diseño de metodología, creación de modelos y participó activamente en la redacción del manuscrito. Miguel Ángel Macías Rodríguez: revisión y comentarios del borrador inicial.

AGRADECIMENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los recursos económicos otorgados como beca nacional del posgrado para la realización de esta investigación, a la Universidad de Guadalajara por las facilidades brindadas para desarrollo de este trabajo. Al Sr. Héctor Pineda y a la comunidad ejidal Ajijic, Chapala, Jalisco, por su apoyo en los trabajos de campo.

FINANCIAMIENTO

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) ahora SECIHTI (financiamiento) y Universidad de Guadalajara (recursos y materiales).

REFERENCIAS

- Afzal, I., Iqar, I., & Shinwari, Z. K. (2017). Plant growth promoting potential of endophytic bacteria isolated from wild roots of *Dodonaea viscosa* L. *Plant Growth Regulation*, 81, 399–408. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-016-0216-5>
- Albuquerque, F., Macías-Rodríguez, M. A., Burquez, A., & Rowe, H. (2020). Toward an understanding of broad scale patterns of the habitat suitability of fountain grass (*Cenchrus setaceus* (Forssk.) Morrone, Poaceae). *Plant Ecology*, 221, 1029–1043. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01060-x>
- Albuquerque, F., Benito, B., Rodríguez, M. A. M., & Gray, C. (2018). Potential changes in the distribution of *Carnegiea gigantea* under future scenarios. *PeerJ*, 6, e5623. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.5623>
- Al-Rajab, J. M. (2021). Solar radiation and its role in plant growth. In *The sun: The source of energy – Hydrometeorology* (Cap. 2). Al-Mustansiriyah University.
- Amatulli, G., Domisch, S., Tuanmu, M. N., Parmentier, B., Rani-peta, A., Malczyk, J., & Jetz, W. (2018). A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. *Scientific Data*, 5, 180040. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.40>

- Araujo, S. D. S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2016). Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*, 7, 646. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>
- Baruch, Z., Jones, A. R., Hill, K. E., McInerney, F. A., Blyth, C., Caddy-Retalic, S., Christmas, M. J., Gellie, N. J. C., Lowe, A. J., Martin-Fores, I., Nielson, K. E., & Breed, M. F. (2018). Functional acclimation across microgeographic scales in *Dodonaea viscosa*. *AoB PLANTS*, 10, ply029. DOI: <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply029>
- Calderón de Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (2006). *Sapindaceae*. In *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes* (Fascículo 142, 70 pp.). Instituto de Ecología, A.C.
- Camacho, M., González, K., & Mancera, O. (1993). *Guía tecnológica para el cultivo del chapulxtle Dodonaea viscosa (L.) Jacq.: Arbusto útil para producción de tutores hortícolas, control de erosión y setos urbanos* (Guía Tecnológica No. 1). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos & Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias.
- Chen, W., Yao, J., Li, Y., Zhao, L., Liu, J., & Guo, Y. (2019). Nulliplex-branch, a TERMINAL FLOWER1 ortholog, controls plant growth habit in cotton. *Theoretical and Applied Genetics*, 132, 97–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3197-0>
- El-Sayed, S. M., Mohamed, A. S., & Thabet, R. S. (2022). Studying the influence of gamma irradiation on germination, vegetative growth, photosynthetic pigments and biochemical characteristics of *Dodonaea viscosa* L. plant. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 11(4), 1168–1180. DOI: <https://doi.org/10.36632/mejar/2022.11.4.77>
- Espinoza-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., Pizano-Andrade, J. C., & Salcedo-Pérez, P. E. (2025). Botanical extracts with biostimulant potential for agriculture in Mexico: A review. *Biotechnia*, 27, e2633. DOI: <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2633>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Freeman, B. G., Scholer, M. N., Ruiz-Gutiérrez, V., & Fitzpatrick, J. W. (2018). Climate change causes upslope shifts and mountaintop extirpations in a tropical bird community. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 11982–11987. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1804224115>
- Guerin, G. R., Wen, H., & Lowe, A. J. (2012). Leaf morphology shift linked to climate change. *Biology Letters*, 8(5), 882–886. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0458>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147–186. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- GBIF.org. *GBIF Occurrence Download*. <https://doi.org/10.15468/dl.uvqsvc> (Consultado 2023, June 6).
- Huang, B., & Fry, J. (1998). Anatomical, physiological and morphological responses of roots to drought stress for tall fescue cultivars. *Crop Science*, 38, 1017–1022. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800040022x>
- Katiyar, P., Pandey, N., & Keshavkant, S. (2022). Gamma radiation: A potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem. *Plant Stress*, 5, 100089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100089>
- Kelly, A. E., & Goulden, M. L. (2008). Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11823–11826. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0802891105>
- Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.03.006>
- Li, X., Zhang, L., Ahammed, G. J., Li, Z. X., Wei, J. P., Shen, C., Yan, P., Zhang, L. P., & Han, W. Y. (2017). Stimulation in primary and secondary metabolism by elevated carbon dioxide alters green tea quality in *Camellia sinensis* L. *Scientific Reports*, 7, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08465-1>
- Liu, L., Gou, G., Liu, J., Zhang, X., Zhu, Q., Mou, J., Yang, R., Wan, Y., Meng, L., Tang, S., Wu, Y., & He, Q. (2022). Effects of *Dodonaea viscosa* Afforestation on Soil Nutrients and Aggregate Stability in Karst Graben Basin. *Land*, 11(8), 1140. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081140>
- Liu, J., & Noshiro, S. (2003). Lack of latitudinal trends in wood anatomy of *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae), a species with a worldwide distribution. *American Journal of Botany*, 90(4), 532–539. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.90.4.532>
- Michaletz, S. T., Kerkhoff, A. J., & Enquist, B. J. (2018). Drivers of terrestrial plant production across broad geographical gradients. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 166–174. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12685>
- Muhammad, A., Tel-Cayan, G., Ozturk, M., Duru, M. E., Nadeem, S., Anis, I., & Shah, M. R. (2016). Phytochemicals from *Dodonaea viscosa* and their antioxidant and anticholinesterase activities with structure–activity relationships. *Pharmaceutical Biology*, 54(9), 1649–1655. DOI: <https://doi.org/10.3109/13880209.2015.1113992>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Keywan, R., Dale, S. R., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Pérez-Mayorga, S., De la Cruz, L. L., Salcedo, P. E., Enríquez, V. J. N., & Ramírez, L. C. B. (2022). Extractos de hojas de *Dodonaea viscosa* de polaridad ascendente sobre estadios de *Spodoptera frugiperda*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 455–467. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i3.2841>
- Phillips, S. J. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Rodríguez-Craverro, J. F., Gutiérrez, D. G., & Katinas, L. (2017). Lectotypifications in Uruguayan *Stevia* (Asteraceae, Eupatoriaceae). *Phytotaxa*, 291, 116–122. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.291.2.2>
- Rubenstein, M. A., Weiskopf, S. R., & Bertrand, R. (2023). Climate change and the global redistribution of biodiversity: Substantial variation in empirical support for expected range shifts. *Environmental Evidence*, 12, 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0>

- Vignali, S., Barras, A. G., Arlettaz, R., & Braunisch, V. (2020). SDMtune: An R package to tune and evaluate species distribution models. *Ecology and Evolution*, 10, 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.6786>
- Wang, G., Tang, G., Pang, D., Liu, Y., Wan, L., & Zhou, J. (2021). Plant interactions control the carbon distribution of *Dodonaea viscosa* in karst regions. *PLoS ONE*, 16(11), e0260337. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260337>
- Wang, X., Yan, B., Fan, B., Shi, L., & Liu, G. (2018). Temperature and soil microorganisms interact to affect *Dodonaea viscosa* growth on mountainsides. *Plant Ecology*, 219(7), 759–774. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0832-4>
- Xu, G. Q., Farrell, C., & Arndt, S. K. (2022). Climate of origin does not influence drought-adaptive traits or drought responses of a widely distributed polymorphic shrub. *Tree Physiology*, 42(1), 86–98. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab085>
- Yepes, A., & Silveira, M. (2011). Plant responses to meteorological events related to climate change: Review. *Colombia Forestal*, 14(2), 213–232. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.2.a06>
- Zahang, Q., Pan, X. B., & Ma, Z. G. (2009). *The Drought*. Meteorological Press.
- Zhao, Z., Ashraf, M. I., & Meng, F. R. (2013). Model prediction of soil drainage classes over a large area using a limited number of field samples: A case study in the province of Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(1), 73–83. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss2011-095>

Recibido: 07.12.2024

Aceptado: 28.06.2025