

Análisis del nicho climático de *Coryphantha durangensis* (Runge ex Schum.) Britton y Rose, 1923 e identificación de zonas potenciales para su conservación ante el cambio climático

Analysis of the climatic niche of *Coryphantha durangensis* (Runge ex Schum.) Britton y Rose, 1923, and identification of potential zones for its conservation in the face of climate change

Estrada-Rodríguez JL, Romero-Méndez U[†], Becerra-López JL*, Czaja Alexander, López-Martínez H, Reyes-Muñoz JL, Ávila-Rodríguez V, Cardoza-Martínez GF, Estrada-Arellano JR

Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n, Frac. Filadelfia, C.P. 35010. Gómez Palacio, Durango.

RESUMEN

Coryphantha durangensis es una cactácea endémica que habita en México, en el centro del desierto Chihuahuense, y está considerada en la categoría de Protección Especial por la NOM-059-SEMARNAT-2010. Una de las mayores amenazas para esta especie es el cambio climático y pérdida de idoneidad climática para su presencia, en el presente estudio se evaluó el nicho climático de *C. durangensis* y se modeló la disponibilidad climática de esta especie mediante el algoritmo MaxEnt bajo condiciones del clima actual y futuro. Los resultados muestran una reducción en las zonas geográficas que presentan condiciones climáticamente adecuadas para la presencia de esta especie para el año 2050 y 2070. Sin embargo, se identificaron cuatro sitios que podrían ser propuestos como áreas de conservación para ésta y otras especies que cohabitan en estas zonas.

Palabras clave: idoneidad, clima, nicho, conservación.

ABSTRACT

Coryphantha durangensis is an endemic cactus that lives in Mexico, at the center of the Chihuahuan desert, and is considered a Special Protection by the NOM-059-SEMARNAT-2010. Climate change and habitat loss are the greatest threats to this species. In the present study, the climatic niche of *C. durangensis* was evaluated and the habitat availability of this species was modeled using the MaxEnt algorithm under current climate conditions and future. The results show a reduction in the geographical areas that present climatically suitable conditions for the presence of this species for the years 2050 and 2070. However, four sites were identified, which could be proposed as potential conservation areas for this and other species that cohabit in these zones.

Keywords: suitability, climate, niche, conservation.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la crisis de la biodiversidad, el impacto del cambio de uso de suelo sobre los ecosistemas y sobre las especies y el cambio climático deben constituir ejes centrales en la biología de la conservación (Rosenstock, 2011). El cambio climático es cualquier alteración del clima ocasionada por la variabilidad natural o la actividad humana

(Ramírez-Ojeda *et al.*, 2014) y se prevé afectará la distribución y presencia de especies del desierto, incluyendo las cactáceas (Cardoza-Martínez *et al.*, 2019). En este sentido, el análisis del nicho es de gran relevancia para pronosticar la viabilidad de las especies ante variaciones ambientales (Soberón y Nakamura, 2009), entendiendo el nicho como aquellas condiciones abióticas en las que una especie puede mantener poblaciones sin aporte migratorio (Grinnell, 1917).

Actualmente se ha utilizado el modelado de nicho ecológico para determinar la distribución geográfica de varias especies, para identificar los factores ambientales que las limitan, así como para obtener las métricas de solapamiento, expansión y divergencia de nichos ecológicos (Peterson *et al.*, 2011; Cuervo-Robayo *et al.*, 2017). Las técnicas de modelaje que requieren sólo datos de presencias han sido valiosas (Peterson *op. cit.*) y se han utilizado para modelar con diversos algoritmos como por ejemplo MaxEnt (Phillips *et al.*, 2005). En este algoritmo los modelos correlativos de la distribución de la especie y su ambiente se han modelado con una alta capacidad predictiva (Olden *et al.* 2008; Evans *et al.* 2013). El algoritmo MaxEnt es utilizado para la estimación de la densidad de probabilidad, utilizando un conjunto de muestras de una distribución objetivo en algún espacio dado, además de un conjunto de capas climáticas y restricciones conocidas en el área accesible de la especie en cuestión, donde se maximiza la probabilidad de las muestras (Duddik *et al.*, 2004). El resultado sería un modelo de su nicho ecológico, el cual puede ser proyectado al espacio geográfico para generar un mapa que represente la distribución potencial, este modelo asimismo puede ser proyectado bajo escenarios de cambio climático (PNUD, 2017).

Coryphantha durangensis es una cactácea endémica del estado de Durango y Coahuila, inventariada como preocupación menor dentro de la lista roja de la UICN (Ditch *et al.*, 2017) e inventariada como sujeta a Protección Especial (Pr) dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Ante el cambio climático global, la comprensión de cómo la idoneidad climática de una especie se pierde o se adapta a los entornos climáticos cambiantes es de gran relevancia para la detección temprana de especies vulnerables a estas variaciones ambientales (Hernández-Lambraño *et al.*, 2016). Con relación

*Autor para correspondencia: José Luis Becerra López
 Correo electrónico: biologo.jlbl@gmail.com

Recibido: 9 de marzo de 2022

Aceptado: 3 de agosto de 2022

a esto, es importante implementar metodologías que permitan cuantificar los cambios y diferencias de los nichos de las especies, tanto en el contexto climático como en su distribución geográfica, esto con la finalidad de medir el grado de vulnerabilidad del nicho climático de las especies ante las variaciones ambientales, ya sea derivadas del cambio climático global o perturbación antropogénica del hábitat (Broennimann *et al.*, 2012).

Actualmente, no existen estudios sobre el efecto que tendrá el cambio climático global en el nicho climático de *C. durangensis*. En este trabajo se evaluó la ocupación del nicho para esta especie, dentro de su área de distribución, y se analizó la disponibilidad climática bajo diferentes escenarios de cambio climático proyectados al futuro, esto con la finalidad de estimar los aumentos o las pérdidas de sitios con condiciones climáticas adecuadas para la presencia de la especie en estudio. Con la información generada se podrá fortalecer las estrategias de conservación de *C. durangensis*.

METODOLOGÍA

Datos de presencia

Se recopilaron registros de ocurrencias de la especie *C. durangensis* en toda su área de distribución conocida por medio de tres vías, 1) bases de datos disponibles en Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <http://www.gbif.org>), 2) bases de datos de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN; <http://www.iucnredlist.org>) y 3) datos de campo obtenidos por los autores. Fueron eliminados los registros redundantes y aquellos que presentaran poca confiabilidad, que no estuvieran dentro de la distribución conocida de la especie, obteniendo una base final de 28 datos (Figura 1).

Calibración del área M

Para elegir la extensión del área de estudio a modelar o área M, en el programa R Project (R version 3.1.3, R-Core-Team 2015) y utilizando la librería Wallace (Kass *et al.*, 2018), se definió el rango geográfico de estudio. Se tomó en consideración que este incluyera a todos los registros geográficos de presencia dentro de un polígono de 0.5 grados de extensión. De acuerdo a Cuervo-Robayo *op. cit.*, a esta área calibrada con base a los puntos de presencia se le puede considerar como el área M, área de accesibilidad o movilidad y que para Barve *et al.* (2011) corresponde a una hipótesis sobre el área en la cual la especie tiene o ha tenido acceso para dispersarse. Asimismo, la identificación del área M se fundamenta en la premisa de que restringir las áreas de entrenamiento y transferencia de una especie a un acceso teóricamente accesible mejora en gran medida el rendimiento del modelo (Cooper y Soberón, 2017).

Posteriormente, a través de esta misma librería, Wallace (Kass *et al.*, 2018), se extrajeron las 19 capas del clima actual recortadas de acuerdo al área M identificada previamente. Estas capas climáticas contienen la información de las condiciones ambientales registradas desde 1970-2000 con una resolución espacial de 30 arc-segundos de grado,

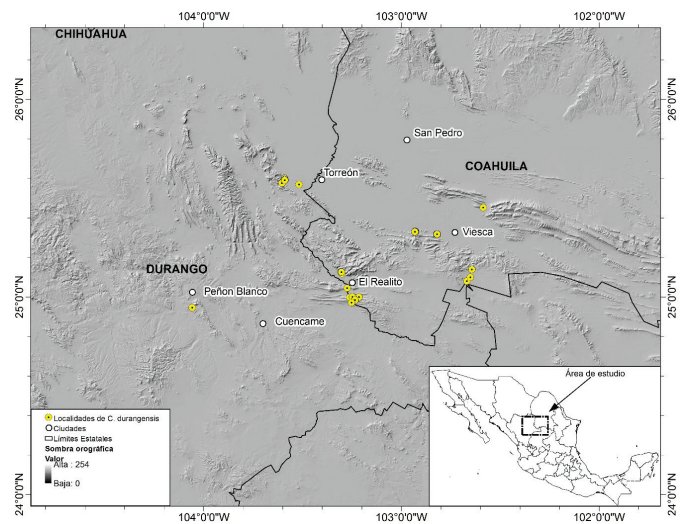


Figura 1. Mapa del área de estudio y localidades de *C. durangensis*.
Figure 1. Map of the study area and localities of *C. durangensis*.

disponibles en la plataforma de WorldClim (Fick y Hijmans, 2017.).

Selección de variables climáticas. Para la selección de las variables ambientales se realizó un análisis de correlación bivariada a través de NicheToolBox (Osorio *et al.*, 2016), esta es una aplicación que cuenta con herramientas para visualizar y analizar el nicho (Osorio *op. cit.*). Para el análisis de correlación primero se agregó información de las 19 variables ambientales del clima actual a los puntos de presencia de la especie y posteriormente se evaluó la relación entre las variables a través del análisis de correlación de Pearson. Este procedimiento permitió eliminar las variables que se encontraron correlacionadas ($r > 0.85$), lo cual disminuye la colinealidad entre variables reduciendo la información redundante (Guizado-Rodríguez *et al.*, 2012). Las variables seleccionadas fueron: Estacionalidad de la temperatura (bio4), Temperatura máxima del mes más cálido (bio5), Temperatura mínima del mes más frío (bio6), Precipitación del mes más seco (bio14), Estacionalidad de la Precipitación (bio15), Precipitación del trimestre más húmedo (bio16) y Precipitación del trimestre más seco (bio17).

Traslape de nicho climático

Para este análisis, el área de distribución de *C. durangensis* se clasificó en dos zonas de ocupación. La zona A considera a las poblaciones ubicadas en el estado de Durango, mientras que la zona B considera a las poblaciones ubicadas en el estado de Coahuila. Posteriormente, para determinar la equivalencia y similitud de nicho climático entre las dos zonas ocupadas por *C. durangensis*, con las variables retenidas en el análisis de correlación bivalente, en el programa R Project a través de la librería ecospat (Broennimann *et al.* (2018) se desarrolló un análisis de componentes principales (PCA) desde el enfoque propuesto por Broennimann *et al.* (2012). Este método compara condiciones climáticas disponibles para una especie dentro de un rango geográfico, determina-

do a partir de sus ocurrencias observadas, y calcula el espacio climático disponible definido por los dos primeros ejes del PCA, además de corregir el sesgo de muestreo utilizando una función de densidad suavizada de Kernel (Broennimann *et al.*, 2012).

El traslape de nicho entre las dos zonas ocupadas por la especie se calculó utilizando la métrica D de Schoener, que varía de 0 (sin superposición entre nichos) a 1 (superposición completa) (Schoener, 1970). Las pruebas de equivalencia y similitud de nicho se realizaron siguiendo la metodología propuesta por Broennimann *op. cit.* La prueba de equivalencia determina si los nichos de dos rangos geográficos son equivalentes (i. e. si la superposición de nicho es constante al reasignar aleatoriamente las ocurrencias de ambos nichos entre los dos rangos), para lo cual todas las ocurrencias se agrupan y se dividen aleatoriamente en dos conjuntos de datos, manteniendo el número de ocurrencias, como en los conjuntos de datos originales. Dicho proceso se repite 100 veces, esto para garantizar que la hipótesis nula pueda rechazarse con confianza; si el valor observado de D cae dentro de la densidad del 95% de los valores simulados, la hipótesis nula de equivalencia de nicho no puede ser rechazada.

Por otra parte, la prueba de similitud examina si la superposición entre nichos observados en dos rangos es diferente de la superposición entre el nicho observado en un rango y los nichos seleccionados al azar del otro rango. Dicha prueba también se basa en 100 repeticiones, si la superposición observada es superior al 95% de los valores simulados la especie ocupará entornos en sus dos rangos que son más similares entre sí de lo esperado al azar.

Modelado de nicho ecológico

Para modelar el nicho de *C. durangensis* se utilizó el algoritmo MaxEnt 3.3.3k (Philips *op. cit.*), el cual genera un gradiente de idoneidad climática que va de 0 (baja disponibilidad) a 1 (alta disponibilidad) (Elith *et al.*, 2011). MaxEnt es reconocido como uno de los algoritmos más robustos para realizar los modelos de nicho ecológico, porque puede ajustarlos a partir de un número reducido de datos; además, requiere únicamente información sobre la presencia de la especie y ha mostrado un buen desempeño en una amplia variedad de especies y regiones (Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017).

Los parámetros de calibración utilizados para obtener dichos modelos fueron el multiplicador de regularización (regularization multiplier) = 1, el número máximo de puntos de fondo (maximum number of background points) = 10000, el límite de convergencia (convergence limit) = 0.00001 y el número máximo de repeticiones (maximum iterations) = 500. Otros parámetros fueron retenidos con sus valores por defecto. Los puntos de fondo fueron creados con 10000 puntos aleatorios, generados automáticamente por MaxEnt. Se eliminaron los registros duplicados de presencia por cada pixel y el formato de la grilla de salida se estableció como formato "logístico". Se utilizaron 100 réplicas para cada modelo o hasta llegar al límite de convergencia. Se trabajó con un

Betamultiplayer de 1, como lo aconseja Pearson *et al.* (2007), pues se trabajó con pocos puntos y a una escala local.

Se utilizaron las tres técnicas de remuestreo disponibles en MaxEnt: subsampling, crossvalidation y bootstrapping con 30% de prueba y 70% de entrenamiento. Posteriormente, los resultados se evaluaron considerando el área bajo la curva (AUC), donde el bootstrapping presentó los valores más altos de AUC en sus modelos y gráficas de omisión. Se utilizó el umbral empírico calculado por MaxEnt: Minimum training presence de cada modelo, para minimizar los errores de omisión y comisión, generando así los mapas de presencia-ausencia (Urbani *et al.*, 2017).

La información obtenida de los modelos calibrados para el área M de la especie en estudio fue proyectada considerando las variables ambientales retenidas en el análisis de correlación bivariada. Asimismo, esta calibración fue proyectada a los escenarios de cambio climático propuestos para los años 2050 (2041-2060) y 2070 (2061-2080), considerando la concentración de gases de efecto invernadero RCP 8.5; correspondiente a los Modelos de circulación Global CCSM4 de datos IPPC5 (CMIP5) a 30 arcosegundos de resolución (Becerra-López, *et al.*, 2020). El Modelo del Sistema Climático Comunitario (CCSM), hoy referido al modelo CESM1, es un modelo climático acoplado para simular el sistema climático de la Tierra. Está compuesto por cuatro modelos separados simulando a la vez la atmósfera terrestre, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, y un componente acoplador central. El CCSM permite llevar a cabo investigaciones fundamentales sobre los estados climáticos del pasado, presente y futuro de la Tierra (<http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/>). Para determinar la precisión de los modelos, en diferentes épocas, se tomó como referencia el AUC.

La importancia de cada variable bioclimática en la distribución observada de *C. durangensis* se evaluó de acuerdo a la importancia relativa de cada variable, la cual se obtuvo sumando el porcentaje de aporte (PC) y la importancia de la permutación (IP), evaluado por MaxEnt, y el resultado se dividió entre dos (contribución promedio (PC + IP)/2) (Anadón *et al.*, 2015).

Como último paso, se midió la idoneidad climática dentro del Área M en las condiciones climáticas actuales y futuras. También, se identificó la vulnerabilidad de la idoneidad climática de *C. durangensis* al cambio climático, utilizando el siguiente análisis de tasa de cambio: % de cambio = $[(S1-S0) / S0] * 100$, donde S0 es la superficie total del área de estudio, según el escenario base, y S1 es la superficie total ocupada en el área de estudio bajo condiciones de cambio (Gutiérrez y Trejo, 2014).

RESULTADOS

Traslape de nicho climático

En análisis de equivalencia entre la zona A y zona B con presencia de *C. durangensis* muestra un estadístico D = 0.033 y un valor de $p > 0.05$ (Figura 2). Por otra parte, el análisis de similitud de dos colas indica que al comparar la zona A con zona B, el estadístico D presenta un valor de 0.033

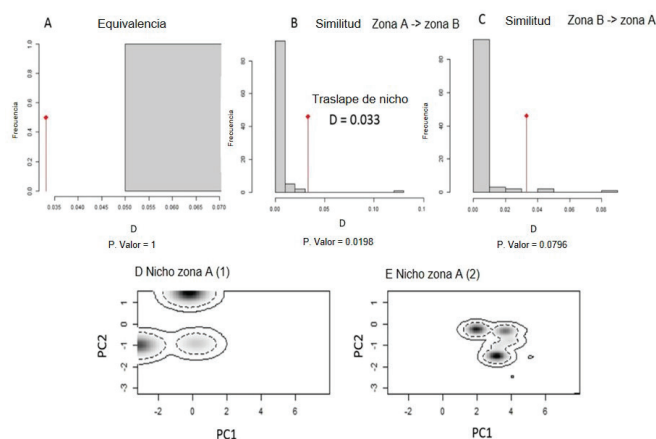


Figura 2. En el panel superior se muestran las gráficas del análisis de equivalencia de nicho (A) y la prueba de similitud de ambos nichos ecológicos (B y C) en ambos sentidos. En el panel inferior se muestran las figuras D y E, las cuales corresponden al análisis de densidad suavizada de Kernel que cuantifica el solapamiento del nicho ecológico. La línea punteada representa el 50% y la línea continua representa el 100% de la densidad.

Figure 2. The upper panel shows the graphs of niche equivalence analysis (A) and the similarity test of both ecological niches (B and C) in both directions. The lower panel shows figures D and E, which correspond to Kernel's smoothed density analysis that quantifies the ecological niche overlap. The dotted line represents 50% and the solid line represents 100% density.

y un valor P de 0.0198, mientras que al comparar la zona B con zona A, la similitud del estadístico D presenta un valor de 0.033 y un valor P de 0.0796 (Figura 2).

Modelado de nicho ecológico. Tanto para los modelos de nicho del clima actual como para los escenarios climáticos futuros, los valores del AUC fueron mayores o iguales a 0.95, lo que indica que los modelos presentan un buen rendimiento.

De acuerdo a los resultados de MaxEnt, bajo condiciones del clima actual las variables bio4, bio15 y bio16 son las que mayor contribución presentan en la generación de zonas climáticamente idóneas para la presencia de *C. durangensis*. En el modelo generado para el año 2050, las variables que mayor contribución presentaron fueron elevación, bio4 y bio16. Mientras que para el modelo generado para el año 2070, las variables de mayor contribución fueron bio15, elevación y bio16. El resto de las variables no presentó una contribución relevante en la identificación de zonas climáticamente adecuadas para la especie (Tabla 1).

La idoneidad climática para la especie en estudio indica un área de 5316.912 km² bajo condiciones del clima actual. Sin embargo, las proyecciones realizadas para el año 2050 y 2070 sugieren que la idoneidad climática de esta especie podrá disminuir a 2299.013 km² y 802.499 km², respectivamente (Tabla 2). Estos resultados indican que entre el año 2050 y 2070 podría ocurrir una pérdida de idoneidad climática para la especie en estudio de entre el 56.7 % y 84.9 %, respectivamente. Sin embargo, la inspección de las áreas de cambio muestra que las zonas llamadas Sierra de Lerdo, El Realito, Sierra de Viesca y Sierra de Parras presentan condiciones climáticamente adecuadas para la presencia de *C. durangensis*, que se mantienen a través de los diferentes escenarios climáticos utilizados en este estudio (Figura 3).

Tabla 1. Se muestran las variables que mayor contribución presentaron en la generación de los modelos de nicho climático bajo condiciones del clima actual y futuro (2050 y 2070). Estacionalidad de la temperatura (bio4), Estacionalidad de la precipitación (bio15), Precipitación del trimestre más húmedo (bio16) y elevación (ELEV).

Table 1. Variables that presented the greatest contribution in the generation of climate niche models under current and future climate conditions (2050 and 2070) are shown. Seasonal Temperature (bio4), Seasonal Precipitation (bio15), Precipitation of wettest quarter (bio16), and the elevation (ELEV).

PRESENTE			
Variable	Contribución	Permutación	Promedio
bio16	28.6	57.3	42.95
bio4	21.6	5.1	13.35
bio15	19.6	22.7	21.15
FUTURO 2050			
Variable	Contribución	Permutación	Promedio
ELEV	44.7	19.9	32.3
bio4	28.4	19.1	23.75
bio16	9.0	48.9	28.95
FUTURO 2070			
Variable	Contribución	Permutación	Promedio
ELEV	39.4	2.3	20.85
bio16	17.2	54.5	35.85
bio15	11.3	11.3	11.3

Tabla 2. Cambios en la superficie de disponibilidad climática de los modelos de nicho de *Coryphantha durangensis* para el año 2050 y 2070 a través del escenario climático RCP 8.5, superficie medida en Km².

Table 2. Changes in the climatic availability area of the niche models of *Coryphantha durangensis* for the year 2050 and 2070 through the RCP 8.5 climate scenario, area measured in Km².

Modelo	Área en Km ²	Cambio en %
Presente	5316.912	0
Futuro 2050	2299.013	-56.76
Futuro 2070	802.499	-84.90

DISCUSIÓN

El análisis de equivalencia entre la zona A y zona B con presencia de *C. durangensis* muestra un estadístico $D = 0.033$, $p > 0.05$. Al respecto, Warren *et al.* (2008) plantea que la hipótesis nula de equivalencia, la cual indica para nuestro caso de estudio que las zonas ocupadas por *C. durangensis* no son ecológicamente distintas, se aceptará siempre y cuando el valor de significancia obtenido durante este análisis sea superior a 0.05. En contraste, si el valor de significancia obtenido es menor a 0.05 se rechazará la hipótesis nula y se aceptará la hipótesis alterna. Con base en lo mencionado, nuestros resultados sugieren que entre las dos zonas con presencia de *C. durangensis* no existe una equivalencia climática.

Por otra parte, los resultados del análisis de similitud muestran valores de significancia de 0.0198 al comparar la zona A con la zona B y una significancia de 0.0796 al comparar la zona B con la zona A. Al respecto, Broennimann *et al.* (2012) mencionan que la similitud de nicho se refiere a cómo

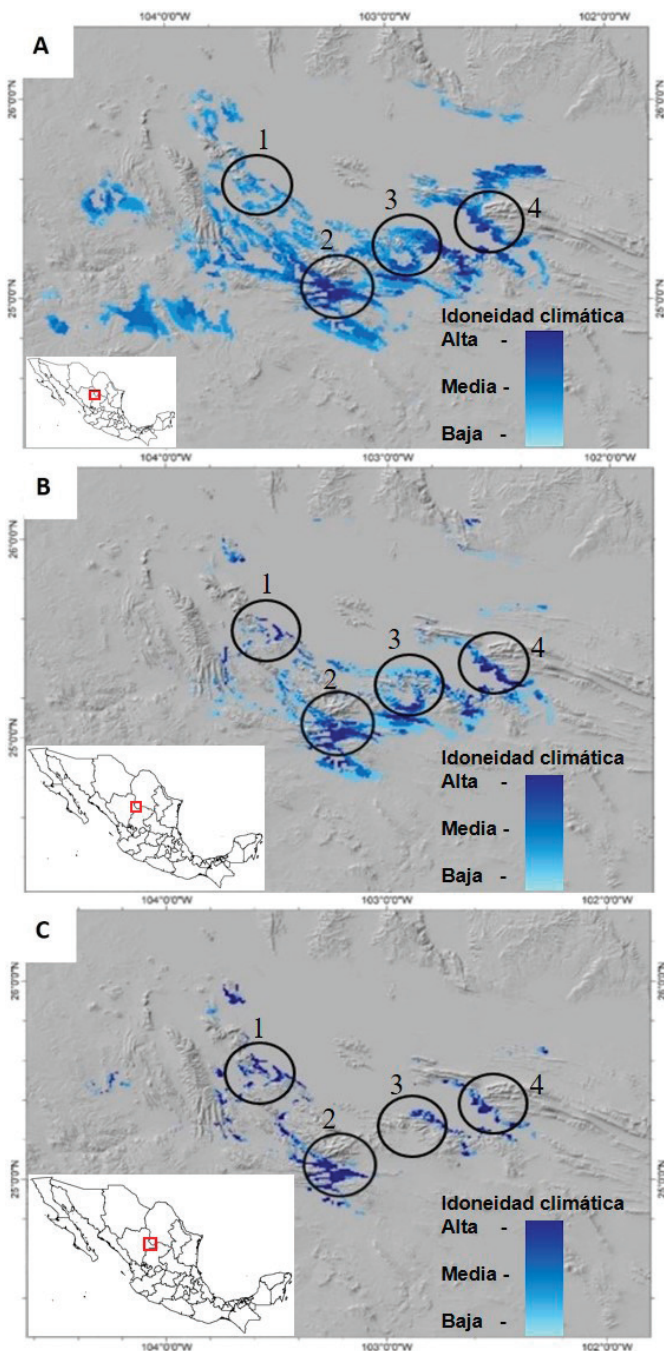


Figura 3. A = modelo clima actual (1960-1990); B = modelo del futuro 2050 (2041-2060); C = modelo del futuro 2070 (2061-2080). Los círculos negros representan zonas donde permanecen áreas de máxima idoneidad y podrían considerarse para posibles áreas de conservación de esta especie: 1. Sierra de Lerdo, 2. El Realito, 3. Sierra de Viesca y 4. Sierra de Parras.

Figure 3. A = current climate model (1960-1990); B = climate model projection for 2050 (2041-2060); C = climate model projection for 2070 (2061-2080). Black circles represent zones with remaining areas of maximum suitability which could be considered for possible conservation areas for this species: 1. Sierra de Lerdo, 2. El Realito, 3. Sierra de Viesca and 4. Sierra de Parras.

el entorno climático de un rango geográfico ocupado por una especie predice a otro rango geográfico ocupado por la especie, esto mejor de lo que se esperaría por azar bajo un modelo nulo específico. Esta prueba de similitud es muy estricta ya que considera que dos rangos geográficos ocupados por la especie serán similares solo si la prueba presenta valores estadísticos significativos en ambas direcciones. Bajo este criterio, los resultados de la prueba de similitud permiten rechazar la hipótesis nula de similitud climática propuesta por Broennimann *et al.* (2012). Por lo que es posible señalar que las dos zonas con presencia de *C. durangensis* no son climáticamente similares, en consecuencia es posible mencionar que está ocupando dos zonas climáticamente distintas.

En este sentido, se ha mencionado que la ocupación de diferentes nichos por una especie podrá tener importantes implicaciones para el entendimiento de su vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático (Wiens *et al.*, 2005). Se ha señalado que aquellas especies que son capaces de ocupar entornos ambientales contrastantes podrán verse menos afectadas por la variación local en la disponibilidad de recursos y las condiciones ambientales, porque pueden persistir en varios tipos de hábitats (Brown, 1984). En consecuencia, bajo esta perspectiva, se esperaría que las especies con nichos más amplios puedan ser menos vulnerables a la variación ambiental abrupta bajo el cambio climático antropogénico (Johnson, 1998).

Por otra parte, existe evidencia sustancial que respalda la teoría de que las especies endémicas y con limitada capacidad de dispersión o distribución fragmentada son más propensas a la extinción (Thomas *et al.*, 2004; Malcolm *et al.*, 2006). Asimismo, se ha reportado que los nichos reducidos impulsan el riesgo de extinción de una especie ante las variaciones del cambio climático; por ejemplo, esto se ha demostrado en peces (Munday, 2004), murciélagos (Boyles y Storm, 2007), aves (Seoane y Carrascal, 2008), anfibios (Botts *et al.*, 2013) y plantas (Ozinga *et al.*, 2013).

Con relación a lo anterior, la hipótesis que sugiere que aquellas especies que ocupan diferentes nichos son menos vulnerables a las variaciones climáticas ha sido planteada, en la mayoría de los casos, para especies que presentan una amplia distribución geográfica (Baltzer *et al.*, 2007). Por lo que surge la pregunta de si ¿Esta hipótesis puede ser aplicada en aquellas especies de distribución restringida pero que ocupan zonas climáticas no similares? Al respecto, los resultados obtenidos en el presente estudio para *C. durangensis* indican que la disponibilidad de hábitat proyectada para el año 2050 podrá disminuir un 56.7 % y para el 2070 se estima una reducción de un 84.9 %. Estas evidencias sugieren que la ocupación de dos nichos por una misma especie puede ocurrir tanto en especies con amplia distribución, como en aquellas especies con distribución restringida. Sin embargo, en nuestro caso de estudio, la ocupación de más de un nicho climático en una especie con distribución restringida no disminuye el riesgo de extinción ante las variaciones ambientales ocasionadas por el cambio climático.

Por otra parte, se ha mencionado que las zonas geográficas que mantienen condiciones ambientales óptimas para una especie (bajo diferentes escenarios de cambio climático) pueden ser consideradas como áreas prioritarias para su conservación (Becerra-López *et al.*, 2017). Al respecto, los modelos de idoneidad climática generados en este estudio, indican que las zonas identificadas como El Realito (Durango), Sierra de Lerdo (Durango), Sierra de Parras (Coahuila) y Sierra de Viesca (Coahuila) mantendrán la idoneidad de climática óptima en cuanto a las variables Estacionalidad de la temperatura, Estacionalidad de la Precipitación y Precipitación del trimestre más húmedo, para la presencia de *C. durangensis* a través de las variaciones climáticas proyectadas para esta zona geográfica a largo plazo, por lo cual, pueden ser consideradas como sitios prioritarios para la conservación de *C. durangensis*.

CONCLUSIONES

En conclusión, se sugiere que independientemente de que *C. durangensis* pueda estar utilizando dos entornos climáticos distintos dentro de su área de distribución actual, este no es un factor que le permita disminuir su vulnerabilidad ante las variaciones ambientales generadas por el cambio climático global. Ante esto, es necesario promover la conservación y protección de aquellos entornos geográficos que mantendrán las condiciones climáticas óptimas para la persistencia de esta especie en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Esta obra científica es dedicada a la memoria del Dr. Ulises Romero Méndez quien por décadas contribuyó en la generación de conocimiento científico enfocado a la conservación de los ecosistemas de México. Su legado permanecerá vivo a través de sus alumnos y obras científicas, descanse en paz maestro uly y gracias por todo!

REFERENCIAS

- Anadón, J.D.; Graciá, E.; Botella, F.; Giménez, A.; Fahd, S. and Fritz, U. Individualistic Response to Past Climate Changes: Niche Differentiation Promotes Diverging Quaternary Range Dynamics in the Subspecies of *Testudo Graeca*. *Ecography* 2015. 38, 956-966.
- Ballesteros-Barrera, C., Aguilar-Romero, O., Zarate-Hernández, R. y Ballesteros-Tapia, L. 2017. Distribución geográfica y conservación de nueve especies del género *Ferocactus* (Cactaceae) en México. *Revista Fitotecnia Mexicana* [Consultado: 7 de octubre de 2018] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61051413005>> ISSN 0187-7380.
- Baltzer, J.L., Davies, S.J., Noor, N.S.M., Kassim, A.R. y LaFrankie, J.V. 2007. Geographical distributions in tropical trees: Can geographical range predict performance and habitat association in co-occurring tree species? *Journal of Biogeography*. 34: 1916-1926.
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., ... y Villalobos, F. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*. 222 (11): 1810-1819.
- Botts, E. A., Erasmus, B. F. N. y Alexander, G. J. 2013. Small range size and narrow niche breadth predict range contractions in South African frogs. *Global Ecology and Biogeography*. 22: 567-576. <https://doi.org/10.1111/geb.12027>.
- Cardoza-Martínez, G. F., Becerra-López, J. L., Esparza-Estrada, C. E., Estrada-Rodríguez, J. L., Czaja, A., Ehsan, M., ... y Romero-Méndez, U. 2019. Shifts in climatic niche occupation in *Astrophytum coahuilense* (H. Möller) Kayser and its potential distribution in Mexico. *Sustainability*. 11 (4): 1138.
- Becerra-López, J. L., Ramírez-Bautista, A., Romero-Méndez, U., Pavón, N. P., y Sánchez-Rojas, G. 2017. Effect of climate change on halophytic grasslands loss and its impact in the viability of *Gopherus flavomarginatus*. *Nature Conservation*. 21: 39.
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., Romero-Méndez, U., Santana-Espinosa, S., Reyes-Rodríguez, C.M., Ríos-Saucedo, J.C. y Domínguez-Martínez, P. A. 2020. Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*, 12(8), 3455.
- Boyles, J. G. y Storm, J. J. 2007. The perils of picky eating: dietary breadth is related to extinction risk in insectivorous bats. *PLoS ONE*. 2: e672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000672>.
- Broennimann, O., Fitzpatrick, M.C., Pearman, P.B., Petitpierre, B., Pellissier, L., Yoccoz, N.G., Thuiller, W., Fortin, M.J., Randin, C., Zimmermann, N.E., Graham, C.H. y Guisan, A. 2012. Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial environmental data. *Global Ecology and Biogeography*. 21: 481-497.
- Broennimann, O., Petitpierre, B., Randin, C., Engler, R., Di Cola, V., Breiner, F., D'Amen, M., Pellissier, L., Pottier, J., ... y Pio, D. *Ecospat: Spatial Ecology: Miscellaneous Methods*. R Package Version 1.1/2015. Available online: <http://CRAN.R-project.org/package=ecospat> (accessed on 30 November 2018).
- Brown, J.H. 1984. On the relationship between abundance and distribution of species. *The American Naturalist*. 124: 255-279.
- Cooper, J.C. y Soberón, J. 2018. Creating individual accessible area hypotheses improves stacked species distribution model performance. *Global Ecology and Biogeography*. 27: 156-165. DOI: 10.1111/geb.12678.
- Cuervo-Robayo, A. P., Escobar, L.E., Osorio-Olvera, L. A., Nori, J., Varela, S., Martínez-Meyer, E., Velasquez-Tibata, J., Rodríguez-Soto, C., Munguía, M., Castaneda-Alvarez, N.P., Lira-Noriega, A., Soley-Guardia, M., Serra-Diaz, J.M. y Townsend Peterson, A. 2017. Introducción a los Análisis Espaciales con Énfasis en Modelos de Nicho Ecológico. *Biodiversity Informatics*. ISSN 15469735. [Consultado: 23 de mayo 2018] Available at: <<https://journals.ku.edu/jbi/article/view/6507/6016>>. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v12i0.6507>.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. 2019. MODIFICACIÓN del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo, publicada el 30 de diciembre de 2010.
- Duddik, M., Phillips, S.J. y Schapire, R.E. 2004. Performance Guarantees for Regularized Maximum Entropy Density Estimation. Appearing in *Proceedings of the 17th Annual Conference on Computational Learning Theory*. Berlin.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. y Yates, C. J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*. 17 (1): 43-57.

- Evans, M. R., V. Grimm, K., Johst, T., Knuuttila, R., de Langhe, C. M., Lessells, M., Merz, M. A., O'Malley, S. H., Orzack, M., Weisberg, D. J., Wilkinson, O., Wolkenhauer, T. G. y Benton, T. G. 2013. Do simple models lead to generality in ecology? *Trends in Ecology & Evolution*. 28: 578-583.
- Fick, S.E. y R.J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 37 (12): 4302-4315.
- Guizado-Rodríguez, M. A., Ballesteros-Barrera, C., Casas-Andreu, G., Barradas-Miranda, V.L., Tellez-Valdes, O. y Salgado-Ugarte, I.H. 2012. The impact of global warming on the range distribution of different climatic groups of *Aspidoscelis costata costata*. *Zoological Science*. 29 (12): 934-843.
- Gutiérrez I. y Trejo, E. 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. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Grinnell, J. 1917. The niche-relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433.
- Hernández-Lambraño, R. E., González-Moreno, P. y Sánchez-Agudo, J. Á. 2017. Towards the top: niche expansion of *Taraxacum officinale* and *Ulex europaeus* in mountain regions of South America. *Austral Ecology*. 42 (5): 577-589. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019
- Johnson, C. 1998. Species extinction and the relationship between distribution and abundance. *Nature*. 394: 272-274.
- Kass, J. M., Vilela, B., Aiello-Lammens, M. E., Muscarella, R., Merow, C. y Anderson, R. P. 2018. Wallace: A flexible platform for reproducible modeling of species niches and distributions built for community expansion. *Methods in Ecology and Evolution*. 9 (4): 1151-1156. doi:10.1111/2041-210x.12945.
- Malcolm, J. R., Liu, C., Neilson, R. P., Hansen, L. y Hannah, L. E. E. 2006. Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conservation Biology*. 20 (2): 538-548.
- Munday, P. L. 2004. Habitat loss, resource specialization, and extinction on coral reefs. *Global Change Biology*. 10: 1642-1647. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00839.x>.
- Olden, J. D., Lawler, J. J. y Poff, N.L. 2008. Machine learning methods without tears: A primer for ecologists. *The Quarterly Review of Biology*. 83: 171-193.
- Osorio-Olvera L., Barve, V., Barve, N. y Soberón, J. 2016. Nichetoolbox: From getting biodiversity data to evaluating species distribution models in a friendly GUI environment. R package version 0.1.6.0. <https://github.com/luismurao/nichetoolbox>.
- Ozinga, W. A., Colles, A., Bartish, I. V., Hennion, F., Hennekens, S. M., Pavoine, S., Poschlod, P., Hermant, M., Schaminée, J. H. J. y Prinzing, A. 2013. Specialists leave fewer descendants within a region than generalists. *Global Ecology and Biogeography*. 22: 213-222. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2012.00792.x>.
- Pearson, R., Raxworthy C. J., Nakamura M. y Peterson A. T. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. 34: 102-117. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x/full>.
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araújo, M. B. 2011. *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton: Princeton University Press.
- Phillips, S. J. 2005. A brief tutorial on MaxEnt. *AT y T Research*. 190 (4): 231-259.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo). 2017. Modelación de la distribución potencial actual y futura de las especies invasoras de mayor riesgo para México. Elaborado en el marco del proyecto GEF-PNUD 089333 "Aumentar las capacidades de México para manejar especies exóticas invasoras a través de la implementación de la Estrategia Nacional de Especies Invasoras". Martínez-Meyer, E., A.P. Cuervo-Robayo, G.A. Ortiz-Haro y L.A. Osorio-Olvera. Instituto de Biología, UNAM.
- Ramírez-Ojeda, J.A., Ruiz-Corral, C., Pérez-Mendoza, R., Villavicencio-García, S., Mena M. y Durán-Puga, N. 2014. Impactos del cambio climático en la distribución geográfica de *Gossypium hirsutum* L. en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10: 1885-1895.
- Rosenstock, N. 2011. Efectos potenciales del cambio climático y la intensificación Agrícola-Forestal sobre la distribución de los anfibios *Melanophryniscus sanmartini* y *Leptodactylus chaquensis* en Uruguay. Universidad de la República de Uruguay.
- Schoener, T.W. 1970. Nonsynchronous spatial overlap of lizards in patchy habitats. *Ecology*. 51: 408-418.
- Seoane, J. y Carrascal, L. M. 2008. Interspecific differences in population trends of Spanish birds are related to habitat and climatic preferences. *Global Ecology and Biogeography*. 17:111-121. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00351.x>.
- Soberón, J. y Nakamura, M. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (Supplement 2), 19644-19650.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... y Williams, S. E. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature*. 427 (6970): 145-148.
- Urbani, F., D'alessandro, P., y Biondi, M. 2017. Using Maximum Entropy Modeling (MaxEnt) to predict future trends in the distribution of high altitude endemic insects in response to climate change. *Bulletin of Insectology*. 70 (2): 189-200.
- Warren, D.L. Glor, R.E., y Turelli, M. 2008. Environmental niche equivalency versus conservatism: Quantitative approaches to niche evolution. *Evolution*. 62: 2868-2883.
- Wiens, J.J. y Graham, C.H. 2005. Niche conservatism: Integrating evolution, ecology, and conservation biology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 36:519-539.