

# Climate change will affect the distribution of the Mexican Spotted Owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903)

## El cambio climático afectará la distribución del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903)

Manuel A. Salazar-Borunda<sup>1,2</sup>; Martín E. Pereda-Solís<sup>1</sup>; Pablito M. López-Serrano<sup>1</sup>; Jorge A. Chávez-Simental<sup>1</sup>; José H. Martínez-Guerrero<sup>1</sup>; Luis A. Tarango-Arámbula<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango. Calle Constitución núm. 404 sur, zona centro. C. P. 34000. Durango, Durango, México.

<sup>2</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango, Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales. Río Papaloapan núm. 203, col. Valle del sur. C. P. 34000. Durango, Durango, México.

<sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Calle Iturbide núm. 73, col. centro. C. P. 78620. Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México.

\*Corresponding author: [ltarango@colpos.mx](mailto:ltarango@colpos.mx); tel.: +52 492 492 5843.

### Abstract

**Introduction:** The Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903) is a subspecies threatened by habitat destruction and sensitive to climate change. It is distributed in the old forests of the United States and Mexico.

**Objective:** To determine the potential historical (1970-2000) and future (2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080) distribution of the Mexican spotted owl under two climate change scenarios (SSP 245 and SSP 585).

**Materials and methods:** Potential distribution was modeled using the R software with the MaxEnt algorithm, 155 geographically uncorrelated occurrence records, and five bioclimatic layers. Areas of environmental suitability were predicted for eight environmental management units in the United States and Mexico.

**Results and discussion:** Three temperature variables contributed 93.1 % to the model prediction: mean diurnal range (44.8 %), maximum temperature of the warmest month (28.8 %) and average of the coldest quarter (19.5 %). Future scenarios showed gradual and continuous losses of suitable bioclimatic space for the bird in seven management units, especially in the high emissions scenario (SSP 585) in the Sierra Madre Oriental de México (-56.1 to -96.4 %). The Southern Rocky Mountains environmental management unit in the United States was the only one that gained suitable bioclimatic space (51.3 to 167.2 %) in all periods.

**Conclusion:** Although changes are not significant, the loss of areas of bioclimatic suitability begins in 2030 and increases in 2041 and, therefore, climate change represents a current threat to this bird of prey.

### Resumen

**Introducción:** El búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903) es una subespecie amenazada por la destrucción del hábitat y sensible al cambio climático. Esta se distribuye en los bosques maduros de Estados Unidos y México.

**Objetivo:** Determinar la distribución potencial histórica (1970-2000) y futura (2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080) del búho manchado mexicano bajo dos escenarios de cambio climático (SSP 245 y SSP 585).

**Materiales y métodos:** La distribución potencial se modeló con el software R, utilizando el algoritmo MaxEnt, 155 registros de presencia geográficamente no correlacionados y cinco capas bioclimáticas. Las áreas de idoneidad ambiental se predijeron para ocho unidades de manejo ambiental de Estados Unidos y México.

**Resultados y discusión:** Tres variables de temperatura contribuyeron en 93.1 % a la predicción del modelo: rango diurno medio (44.8 %), temperatura máxima del mes más cálido (28.8 %) y promedio del trimestre más frío (19.5 %). Los escenarios futuros mostraron pérdidas paulatinas y continuas de espacio bioclimático idóneo para el ave en siete unidades de manejo, especialmente en el escenario de altas emisiones (SSP 585) en la Sierra Madre Oriental de México (-56.1 a -96.4 %). La unidad de manejo ambiental Montañas Rocosas del Sur, en Estados Unidos, fue la única que ganó espacio bioclimático idóneo (51.3 a 167.2 %) en todos los periodos.

**Conclusión:** Aunque los cambios no son significativos, la pérdida de áreas de idoneidad bioclimática inicia en el 2030 e incrementa en el 2041 y, por tanto, el cambio climático representa una amenaza actual para esta ave rapaz.

**Keywords:** species distribution; bird of prey; habitat loss; extinction risk; conservation plans.

**Palabras clave:** distribución de especies; ave rapaz; pérdida del hábitat; riesgo de extinción; planes de conservación.

Please cite this article as follows (APA 6): Salazar-Borunda, M. A., Pereda-Solís, M. E., López-Serrano, P. M., Chávez-Simental, J. A., Martínez-Guerrero, J. H., & Tarango-Arámbula, L. A. (2022). Climate change will affect the distribution of the Mexican Spotted Owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(2), 305-318. doi: 10.5154/r.rchscfa.2021.10.066

Received: October 19, 2021 / Accepted: April 13, 2022



## Introduction

The Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903) is an iconic conservation subspecies in North America (Wan, Ganey, Vojta, & Cushman, 2018). The bird occurs in mature mixed conifer forests, in trees with diameters > 40 cm, heights > 10 m, aboveground cover > 70 % and diverse vertical structure (Silva-Piña et al., 2018), from the southwestern United States to central Mexico (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT, 2010]; U. S. Fish and Wildlife Service [USFWS, 2012]). In Mexico, this subspecies is classified as threatened (SEMARNAT, 2010) and globally it is in the near-threatened category (BirdLife International, 2020). Although population declines have been associated with habitat loss and fragmentation (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012), the response of the Mexican spotted owl towards other threats is still unknown (Salazar-Borunda, Martínez-Guerrero, Tarango-Arámbula, Pereda-Solís, & López-Serrano, 2020; Wan et al., 2018). In this regard, the U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS, 2012) has subdivided the range of the Mexican spotted owl into Ecological Management Units (EMU's) to investigate, manage, and monitor its threats. These areas are represented by Colorado Plateau, Basin and Range-East, Basin and Range-West, Upper Gila Mountains, Southern Rocky Mountains in the U.S. and by the Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, and the Transverse Neovolcanic Belt in Mexico.

Climate change impacts ecosystems and poses a threat to wildlife (Krishnan, 2021). This phenomenon will reduce the space suitable for species that are directly dependent on climate (Parmesan & Yohe, 2003) and will generate changes in distribution (Chen, Hill, Ohlemuller, Roy, & Thomas, 2011; VanDerWal et al., 2013). Although the movements that species will make are unknown, it is expected that they will move towards latitudinal gradients near the poles (Chen et al., 2011) or make multidirectional movements towards areas with suitable bioclimatic spaces (VanDerWal et al., 2013). Therefore, the identification of areas with future environmental suitability is key to the design of management strategies in a dynamic environmental context (Lawler, Wiersma, & Huettman, 2011).

The few records of some species hinder accurate knowledge of their current distribution (Pearce & Boyce, 2006) and limit conservation measures (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012). In this sense, species distribution models help to solve these limitations by predicting areas with suitable environmental conditions for a particular species (Elith et al., 2006; Guisan et al., 2013), locating new populations (Raxworthy et al., 2003), defining areas with potential for species reintroduction, or predicting the effects of climate

## Introducción

El búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903) es una subespecie ícono de la conservación en Norteamérica (Wan, Ganey, Vojta, & Cushman, 2018). El ave habita en bosques maduros mixtos de coníferas, en árboles con diámetros > 40 cm, alturas > 10 m, cobertura aérea > 70 % y estructura vertical diversa (Silva-Piña et al., 2018), desde el suroeste de Estados Unidos hasta el centro de México (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT, 2010]; U. S. Fish and Wildlife Service [USFWS, 2012]). En México, esta subespecie se clasifica como amenazada (SEMARNAT, 2010) y a nivel mundial se encuentra en la categoría de casi amenazada (BirdLife International, 2020). Aunque la disminución de las poblaciones se ha asociado a la pérdida y fragmentación de su hábitat (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012), aún se desconoce la respuesta del búho manchado mexicano hacia otras amenazas (Salazar-Borunda, Martínez-Guerrero, Tarango-Arámbula, Pereda-Solís, & López-Serrano, 2020; Wan et al., 2018). Al respecto, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS, 2012) ha subdividido el rango de distribución del búho manchado mexicano en Unidades de Manejo Ecológico (EMU, por sus siglas en inglés) para investigar, manejar y monitorear sus amenazas. Estas áreas se representan por Meseta de Colorado, Cuenca y Cordillera del Este, Cuenca y Cordillera del Oeste, Montañas Superiores de Gila, Montañas Rocosas del Sur en EE. UU. y por la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico Transversal en México.

El cambio climático impacta los ecosistemas y representa una amenaza para la vida silvestre (Krishnan, 2021). Este fenómeno reducirá el espacio adecuado para las especies que dependen directamente del clima (Parmesan & Yohe, 2003) y generará cambios en la distribución (Chen, Hill, Ohlemuller, Roy, & Thomas, 2011; VanDerWal et al., 2013). Aunque los movimientos que realizarán las especies son desconocidos, se prevé su desplazamiento hacia gradientes latitudinales cercanos a los polos (Chen et al., 2011) o bien, que realicen movimientos multidireccionales hacia áreas con espacios bioclimáticos adecuados (VanDerWal et al., 2013). Por ello, la identificación de las áreas con idoneidad ambiental futura es clave para el diseño de estrategias de gestión en un entorno ambiental dinámico (Lawler, Wiersma, & Huettman, 2011).

Los pocos registros de algunas especies dificultan conocer con precisión su distribución actual (Pearce & Boyce, 2006) y limitan las medidas de conservación (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012). En este sentido, los modelos de distribución de especies ayudan a resolver estas limitaciones, a través de la predicción de áreas con condiciones ambientales idóneas para una especie

change on their distribution range (Méndez, Méndez, & Cerano, 2020).

The objective of this study was to determine the potential historical (1970-2000 period), short (2021-2040), medium (2041-2060) and long term (2061-2080) distribution of the Mexican spotted owl in the U.S. and Mexican EMU's, under two climate change scenarios (SSP 245 and SSP 585) and considering bioclimatic variables. The knowledge generated will contribute to more appropriate decision making by government agencies in these countries (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012).

## Materials and Methods

### Presence data

Presence coordinates of the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) were taken from the Global Biodiversity Information Facility platform (GBIF, 2019; 949 points), from the governmental report of natural protected areas in Mexico (Garza, 2018; 12 points) and from field records (25 points). Spatial correlation between presences was reduced by considering a circular area between each record of at least 2.67 ha based on the domestic habitat of the bird (Willey & Van Riper, 2014). Points below the threshold area and removal of duplicate records were discriminated using the *spThin* (Aiello-Lammens, Boria, Radosavljevic, Vilela, & Anderson, 2015) and *remove.duplicates* (Bivand, Pebesma, & Gomez-Rubio, 2013; Pebesma & Bivand, 2005; R Core Team, 2021) packages.

### Bioclimatic variables

Bioclimatic data were taken from WorldClim (version 2.1, Fick & Hijmans, 2017) at 2.5 arcmin of spatial resolution (~4.5 km<sup>2</sup>). Of the 19 bioclimatic variables downloaded, the layers for the mean temperature of the wettest (BIO 8) and driest (BIO 9) month, and the precipitation of the warmest (BIO 18) and coldest (BIO 19) quarter were excluded because they combine temperature and precipitation information (Escobar, Lira, Medina, & Peterson, 2014).

Multicollinearity among environmental variables can bias models by representing their biological relevance inadequately (Franklin, 2009). Therefore, to identify variables related to each other, a Pearson correlation test was performed using the *ENMTools* package (Warren, Glor, & Turelli, 2010); likewise, the contribution of each variable to the model was determined using the Jackknife tests (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006). The model was constructed by selecting bioclimatic variables based on their biological importance (Ganey, 2004), individual and collective contribution to the model and level of correlation ( $r < 0.8$ ).

en particular (Elith et al., 2006; Guisan et al., 2013), la localización de poblaciones nuevas (Raxworthy et al., 2003), la definición de áreas con potencial de reintroducción de especies o la predicción de los efectos del cambio climático sobre su rango de distribución (Méndez, Méndez, & Cerano, 2020).

El objetivo de este estudio fue determinar la distribución potencial histórica (periodo 1970-2000), a corto (2021-2040), mediano (2041-2060) y largo plazo (2061-2080) del búho manchado mexicano en las EMU de Estados Unidos y México, bajo dos escenarios de cambio climático (SSP 245 y SSP 585) y considerando variables bioclimáticas. El conocimiento generado contribuirá en la toma de decisiones más adecuada por parte de las agencias gubernamentales de dichos países (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012).

## Materiales y métodos

### Datos de presencia

Las coordenadas de presencia del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) se obtuvieron de la plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2019; 949 puntos), del reporte gubernamental de áreas naturales protegidas en México (Garza, 2018; 12 puntos) y de registros en campo (25 puntos). La correlación espacial entre presencias se redujo al considerar un área circular entre cada registro de al menos 2.67 ha en función del ámbito hogareño del ave (Willey & Van Riper, 2014). Los puntos por debajo del área umbral y la eliminación de los registros duplicados se discriminaron utilizando los paquetes *spThin* (Aiello-Lammens, Boria, Radosavljevic, Vilela, & Anderson, 2015) y *remove.duplicates* (Bivand, Pebesma, & Gomez-Rubio, 2013; Pebesma & Bivand, 2005; R Core Team, 2021).

### Variables bioclimáticas

Los datos bioclimáticos se obtuvieron de WorldClim (versión 2.1, Fick & Hijmans, 2017) a 2.5 minutos de arco de resolución espacial (~4.5 km<sup>2</sup>). De las 19 variables bioclimáticas descargadas se excluyeron las capas de la temperatura media del mes más húmedo (BIO 8) y más seco (BIO 9), y la precipitación del trimestre más cálido (BIO 18) y más frío (BIO 19), debido a que combinan información de temperatura y precipitación (Escobar, Lira, Medina, & Peterson, 2014).

La multicolinealidad entre las variables ambientales puede sesgar los modelos al representar su relevancia biológica de manera inadecuada (Franklin, 2009). Por ello, para identificar las variables relacionadas entre sí, se realizó una prueba de correlación de Pearson mediante el paquete *ENMTools* (Warren, Glor, & Turelli,

Projections for selected bioclimatic variables were taken from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6, Eyring et al., 2016). The global climate models CNRM-ESM2-1 and MIROC6 were used under two shared socioeconomic pathways (SSP). These pathways describe alternative socioeconomic development futures and represent a) high emissions scenario with fossil fuel-driven development and low climate change adaptation (SSP 585) and b) intermediate stabilization scenario, where society adapts mean challenges for climate change mitigation and adaptation (SSP 245) (Keywan et al., 2017). Mean surface temperature increase considered for the extreme scenario was 2.0 °C (8.5 W·m<sup>-2</sup>), while for the conservative scenario it was 1.4 °C (4.5 W·m<sup>-2</sup>).

### Model calibration

When modeling niche and species distribution, the definition of calibration area is fundamental for model generation and transfer (Soberón, Osorio-Olvera, & Peterson, 2017). In this study, the calibration area was defined as the probable range of presence of the Mexican spotted owl (USFWS, 2012) and consisted of a continental area of 772 182 km<sup>2</sup> (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020; U.S. Geological Survey [USGS], 2021) with varied climates (De Alba & Reyes, 1998; National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021). Only confirmed occurrences within the calibration area and 10 000 pseudo-absences were considered in the calibration process; each was assigned a value of 0.5.

### Model of species distribution

Modeling was performed using the *kuenm* package (Cobos, Peterson, Barve, & Osorio, 2019) in R statistical software (R Core Team, 2021). The maximum entropy algorithm (MaxEnt) was used for modeling and multiple models were generated based on the combination of regularization multiplier settings (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 5, 10), entity classes (linear, product, quadratic, hinge, threshold and categorical) and sets of bioclimatic variables. The most appropriate model was selected based on statistical significance (partial ROC with  $P < 0.05$ ), yield (omission rate <5 %) and complexity (lower Akaike information criterion). The model output format was logistic, which considers values between 0 (no suitability conditions) and 1 (bioclimatic suitability area) (Phillips et al., 2006). The model of the historical distribution calculated with the bioclimatic variables for the period 1970 to 2000 and future periods 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050) and 2061-2080 (2070), for the EMU's in the USA and Mexico, was transferred without extrapolation.

2010); asimismo, la contribución de cada variable al modelo en general se determinó mediante pruebas de Jackknife (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006). El modelo se construyó seleccionando las variables bioclimáticas con base en su importancia biológica (Ganey, 2004), aporte individual y colectivo en el modelado y nivel de correlación ( $r < 0.8$ ).

Las proyecciones para las variables bioclimáticas seleccionadas se obtuvieron del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6, Eyring et al., 2016). Los modelos climáticos globales CNRM-ESM2-1 y MIROC6 se utilizaron bajo dos vías socioeconómicas compartidas (SSP). Estas trayectorias describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y representan: a) escenario de altas emisiones con desarrollo impulsado por combustibles fósiles y baja adaptación al cambio climático (SSP 585) y b) escenario de estabilización intermedio, donde la sociedad adapta desafíos medios para la mitigación y la adaptación al cambio climático (SSP 245) (Keywan et al., 2017). El aumento de temperatura media superficial considerada para el escenario extremo fue de 2.0 °C (8.5 W·m<sup>-2</sup>), mientras que para el escenario conservador fue de 1.4 °C (4.5 W·m<sup>-2</sup>).

### Calibración del modelo

En el modelado de nichos y de distribución de especies, la definición del área de calibración es fundamental para la generación y transferencia del modelo (Soberón, Osorio-Olvera, & Peterson, 2017). En este estudio, el área de calibración se definió como el rango probable de presencia del búho manchado mexicano (USFWS, 2012) y constituyó una superficie continental de 772 182 km<sup>2</sup> (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020; U.S. Geological Survey [USGS], 2021) con climas diversos (De Alba & Reyes, 1998; National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021). En el proceso de calibración se consideraron únicamente las presencias confirmadas dentro del área de calibración y 10 000 pseudoausencias; a cada una de ellas se asignó un valor de 0.5.

### Modelo de distribución de especies

El modelado se realizó con el paquete *kuenm* (Cobos, Peterson, Barve, & Osorio, 2019) en el software estadístico R (R Core Team, 2021). Para el modelado se utilizó el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt) y se generaron modelos múltiples en función de la combinación de las configuraciones del multiplicador de regularización (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 5, 10), clases de entidad (lineal, producto, cuadrático, bisagra, umbral y categórico) y de los conjuntos de las variables bioclimáticas. El



## Results

### Model of species distribution

The initial consideration was 986 records of Mexican spotted owl locations; however, the refined database considered 155 geographically uncorrelated records. From combinations of seven regularization multipliers, entity classes and 42 sets of bioclimatic variables, 1470 models were generated and evaluated. The best potential distribution model was obtained with 109 records for training and 46 for execution, with linear response + quadratic response + product, regularization multiplier of 0.5 and five bioclimatic variables: mean temperature range (BIO 2), maximum temperature of the warmest month (BIO 5), mean temperature of the coldest quarter (BIO 11), precipitation of the wettest month (BIO 13) and precipitation of the wettest quarter (BIO 16). The model had an adequate fit with AUC (area under the curve) rates of 0.97 and omission of 0.02 %, partial ROC of 0 and Akaike's criterion also with a value of 0.

### Historical distribution

The model predicted that the historical distribution of the Mexican spotted owl in the U.S. and Mexico covers a discontinuous area of 762 114 km<sup>2</sup> (48.4 % in the U.S. and 51.6 % in Mexico). Areas with higher bioclimatic suitability were most frequently clustered in the central portions of the EMU's (Figure 1), especially those in Mexico.

### Bioclimatic predictors

The distribution of the Mexican spotted owl was most associated with the mean diurnal range of temperature (BIO 2), which contributed the most to the model prediction (44.8 %), the maximum temperature of the warmest month (BIO 5) was 28.8 % and the mean temperature of the coldest quarter (BIO 11) 19.5 %. The precipitation variables of the wettest month and quarter together only predicted 6.9 % of the model.

The response curves to the variables showed different bioclimatic thresholds for the Mexican spotted owl (Figure 2). The mean temperature range stabilized at a bioclimatic suitability of 11 °C and decreased dramatically with increasing temperature (up to 22 °C); the maximum temperature of the warmest month had the highest bioclimatic suitability at 17.5 °C; and the mean temperature of the coldest quarter stabilized at 5 °C, reflecting the environmental conditions of the mainly cold forests where the Mexican spotted owl inhabits. Bioclimatic suitability for precipitation ranged from 100-250 mm and 200-600 mm in the wettest month and quarter, respectively.

modelo más apropiado se seleccionó con base en su significancia estadística (ROC parcial con  $P < 0.05$ ), rendimiento (tasa de omisión <5 %) y complejidad (menor criterio de información Akaike). El formato de salida del modelo fue logístico, el cual considera valores entre 0 (sin condiciones de idoneidad) y 1 (área de idoneidad bioclimática) (Phillips et al., 2006). El modelado de la distribución histórica calculada con las variables bioclimáticas del periodo 1970 a 2000 y futura de los periodos 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050) y 2061-2080 (2070), para las EMU en EE. UU. y México, se transfirió sin extrapolación.

## Resultados

### Modelo de distribución de especies

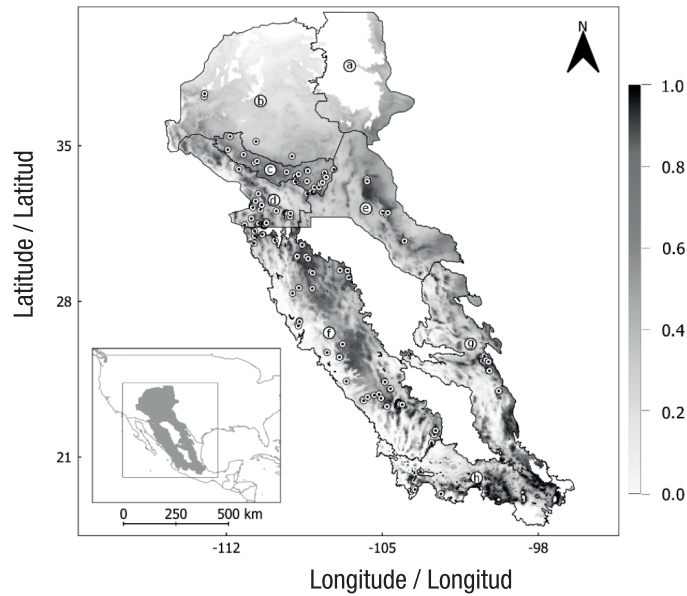
Inicialmente se consideraron 986 registros de ubicaciones del búho manchado mexicano; sin embargo, la base de datos depurada consideró 155 registros geográficamente no correlacionados. A partir de las combinaciones de siete multiplicadores de regularización, clases de entidad y 42 conjuntos de variables bioclimáticas, se generaron y evaluaron 1470 modelos. El mejor modelo de distribución potencial se obtuvo con 109 registros para entrenamiento y 46 para ejecución, con respuesta lineal + cuadrático + producto, multiplicador de regularización de 0.5 y cinco variables bioclimáticas: rango medio de temperatura (BIO 2), temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5), temperatura media del trimestre más frío (BIO 11), precipitación del mes más húmedo (BIO 13) y precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16). El modelo presentó ajuste adecuado con tasas de AUC (área bajo la curva) de 0.97 y de omisión de 0.02 %, ROC parcial de 0 y criterio de Akaike también con valor 0.

### Distribución histórica

El modelo predijo que la distribución histórica del búho manchado mexicano en EE. UU. y México abarca una superficie discontinua de 762 114 km<sup>2</sup> (48.4 % en EE. UU. y 51.6 % en México). Las áreas con mayor idoneidad bioclimática se agruparon con mayor frecuencia en las porciones centrales de las EMU (Figura 1), especialmente en las de México.

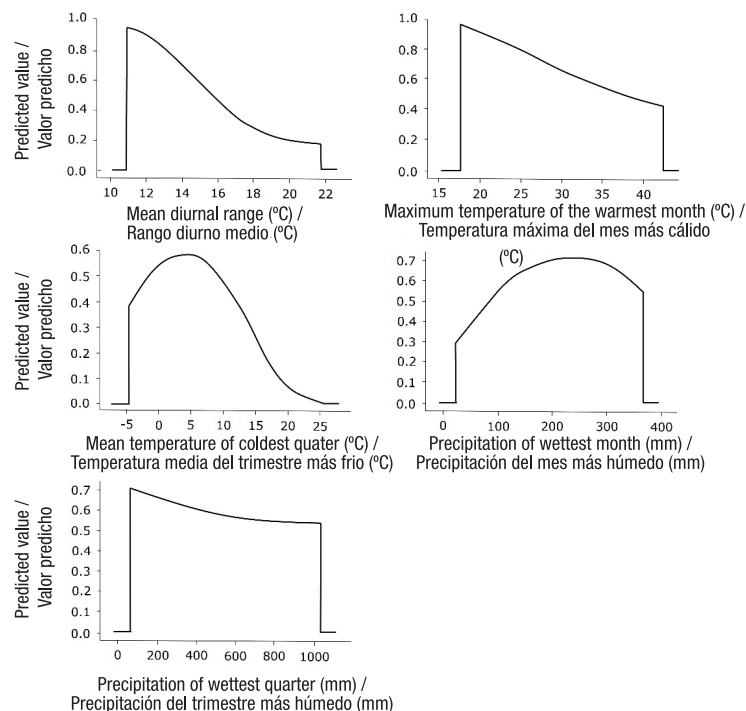
### Predictores bioclimáticos

La distribución del búho manchado mexicano se asoció más con el rango diurno medio de temperatura (BIO 2), el cual contribuyó en mayor medida con la predicción del modelo (44.8 %), la temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5) contribuyó con 28.8 % y temperatura media del trimestre más frío (BIO 11) con 19.5 %. Las variables de precipitación del mes y del trimestre más



**Figure 1. Historical potential distribution model (1970 to 2000) of the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*):** a) Southern Rocky Mountains, b) Colorado Plateau, c) Upper Gila Mountains, d) Basin and Range-West, e) Basin and Range-East in the USA, and f) Sierra Madre Occidental, g) Sierra Madre Oriental and h) Transverse Neovolcanic Belt in Mexico. Dots indicate occurrences ( $n = 155$ ) of the Mexican spotted owl, used for model generation. The figure indicates discontinuous logistic prediction with darker areas (values close to 1) referring to those of higher bioclimatic suitability.

**Figura 1. Modelo de distribución potencial histórica (1970 a 2000) del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*):** a) Montañas rocosas del Sur, b) Meseta de Colorado, c) Montañas Superiores de Gila, d) Cuenca y Cordillera del Oeste, e) Cuenca y Cordillera del Este en EE. UU, y f) Sierra Madre Occidental, g) Sierra Madre Oriental y h) Eje Neovolcánico Transversal en México. Los puntos indican las presencias ( $n = 155$ ) del búho manchado mexicano, utilizadas para la generación del modelo. La figura denota predicción logística discontinua con áreas más oscuras (valores cercanos a 1) referidas a las de mayor idoneidad bioclimática.



**Figure 2. Response curves for each bioclimatic variable used as predictor in the potential distribution model of the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*).**

**Figura 2. Curvas de respuesta para cada variable bioclimática utilizada como predictora en el modelo de distribución potencial del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*).**

Jackknife analysis showed that the diurnal range of temperature (BIO 2) and maximum temperature of the warmest month (BIO 5) had the greatest regularized training gain (Figure 3). Precipitation of the wettest quarter (BIO 16) had the greatest gain when used in isolation containing useful information on bioclimatic conditions suitable for the subspecies. BIO 2 had the lowest decrease in gain when omitted and contained most of the information absent in the other variables to explain the bioclimatic niche of the Mexican spotted owl.

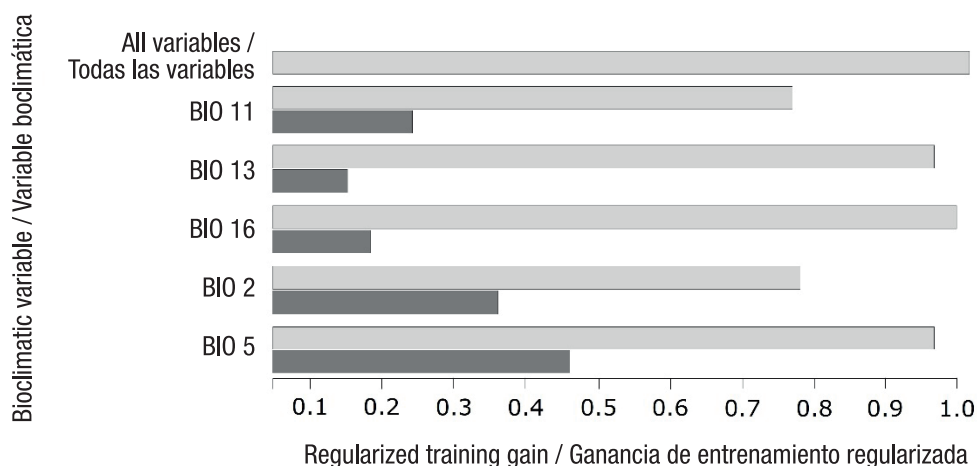
### Future distribution

The distribution of the Mexican spotted owl varied spatially among climate change scenarios (Figure 4). Multidirectional movements and losses from 1.4 % to 96.4 % of suitable areas are predicted in all periods (Table 1). Although these losses vary among global climate models, the scenarios show a steady decrease in suitable bioclimatic space for the bird, especially in the EMU's of Mexico. Models predicted gain of suitable bioclimatic areas for the Mexican spotted owl in the Southern Rocky Mountains, north of its historical distribution, being the only EMU that gained suitable bioclimatic space (51.3 to 167.2 %) in all periods.

húmedos, en conjunto, únicamente predijeron 6.9 % del modelo.

Las curvas de respuesta a las variables mostraron diversos umbrales bioclimáticos para el búho manchado mexicano (Figura 2). El rango de temperatura medio se estabilizó en una idoneidad bioclimática de 11 °C y disminuyó drásticamente con el aumento de la temperatura (hasta 22 °C); la temperatura máxima del mes más cálido tuvo la mayor idoneidad bioclimática a los 17.5 °C; y la temperatura media del trimestre más frío se estabilizó a los 5 °C, lo que refleja las condiciones ambientales de los bosques principalmente fríos en donde el búho manchado mexicano habita. La idoneidad bioclimática para la precipitación se alcanzó desde 100-250 mm y 200-600 mm en el mes y trimestre más húmedo, respectivamente.

El análisis de Jackknife mostró que el rango diurno de temperatura (BIO 2) y temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5) tuvieron la mayor ganancia de entrenamiento regularizado (Figura 3). La precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16) tuvo la mayor ganancia cuando se usó de forma aislada conteniendo información útil sobre las condiciones bioclimáticas idóneas para la subespecie. La BIO 2 obtuvo la menor



**Figure 3.** Regularized training gain for bioclimatic predictors of the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) distribution model using Jackknife analysis. Light gray bars represent regularized gain without a specific variable and dark gray bars represent regularized gain with only that variable. Bioclimatic variables: mean temperature range (BIO 2), maximum temperature of the warmest month (BIO 5), mean temperature of the coldest quarter (BIO 11), precipitation of the wettest month (BIO 13) and precipitation of the wettest quarter (BIO 16).

**Figura 3.** Ganancia de entrenamiento regularizada para predictores bioclimáticos del modelo de distribución del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) usando el análisis de Jackknife. Las barras de color gris claro representan la ganancia regularizada sin una variable específica y las barras de color gris oscuro representan la ganancia regularizada con solo esa variable. Variables bioclimáticas: rango medio de temperatura (BIO 2), temperatura máxima del mes más cálido (BIO 5), temperatura media del trimestre más frío (BIO 11), precipitación del mes más húmedo (BIO 13) y precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16).

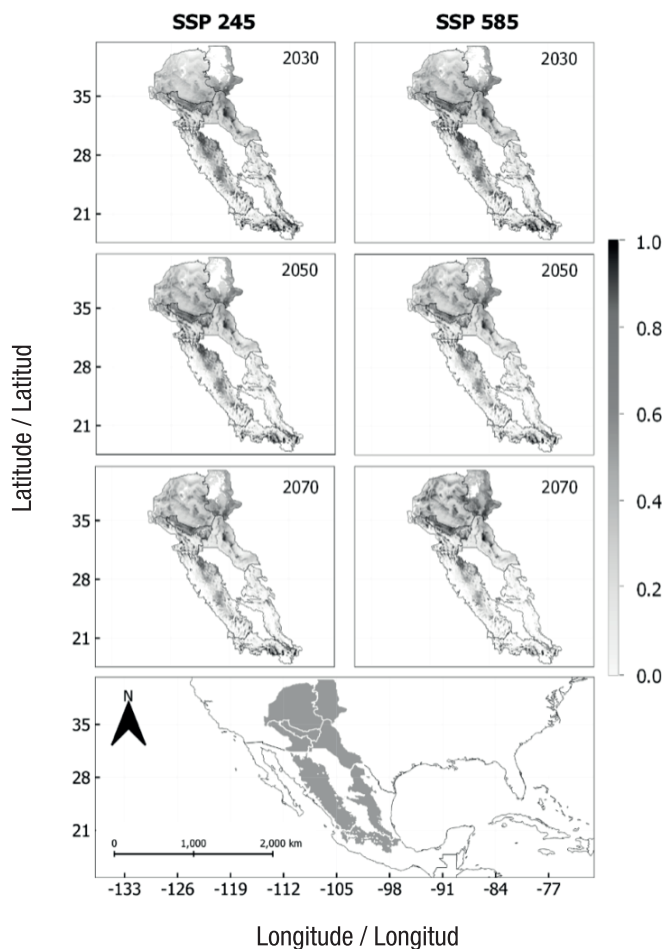
## Discussion

Government agencies assess the effects of climate change on the geographic range of sensitive species (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012); to do so, they use species distribution models, which contribute to conservation plans (Guisan et al., 2013). Although the exclusive use of bioclimatic variables could simplify the biogeographic patterns of the Mexican spotted owl (Dallas, Decker, & Hastings, 2017; Salazar-Borunda et al., 2021b), the predicted bioclimatic suitability areas coincide with the current distribution areas (Salazar-Borunda, Martínez-Guerrero, Tarango-Arámbula, López-Serrano, & Pereda-Solís, 2022; USFWS, 2012). In this regard, the areas of bioclimatic suitability most suitable for the bird's permanence are greater in the center of the East and West Ranges and Basins, and Upper Gila Mountains in the USA, and in the center of

disminución en la ganancia cuando se omitió y contuvo la mayor cantidad de información ausente en las otras variables, para explicar el nicho bioclimático del búho manchado mexicano.

## Distribución futura

La distribución del búho manchado mexicano varió espacialmente entre escenarios de cambio climático (Figura 4). En todos los periodos se predicen movimientos multidireccionales y pérdidas desde 1.4 % hasta 96.4 % de áreas de idoneidad (Cuadro 1). Aunque estas pérdidas varían entre modelos climáticos globales, los escenarios muestran disminución constante del espacio bioclimático adecuado para el ave, especialmente en las EMU de México. Los modelos pronosticaron ganancia de áreas bioclimáticas idóneas para el búho manchado mexicano en las Montañas



**Figure 4. Potential distribution models for the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) for the periods 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050), 2061-2080 (2070) in ecological management units in the U.S. and Mexico, under two emissions scenarios (SSP). Images show logistic prediction with darker areas (values close to 1) indicating higher bioclimatic suitability.**

**Figura 4. Modelos de distribución potencial para el búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) para los periodos 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050), 2061-2080 (2070) en las unidades de manejo ecológico de EE. UU. y México, bajo dos escenarios de emisiones (SSP). Las imágenes muestran predicción logística con áreas más oscuras (valores cercanos a 1) que indican idoneidad bioclimática mayor.**



**Table 1. Variation in future bioclimatic space suitable for the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) in ecological management units in the United States and Mexico, considering low (SSP 245) and high (SSP 585) emissions climate change scenarios.**  
**Cuadro 1. Variación del espacio bioclimático futuro adecuado para el búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) en las unidades de manejo ecológico de Estados Unidos y México, considerando los escenarios de cambio climático de bajas (SSP 245) y altas (SSP 585) emisiones.**

Ecological management units / Unidades de manejo ecológico	Historical distribution (km <sup>2</sup> )/ Distribución histórica (km <sup>2</sup> )	SSP 245			SSP 585				
		Loss or gain (%) / Pérdida o ganancia (%)			Loss or gain (%) / Pérdida o ganancia (%)				
		2030	2050	2070	2030	2050	2070		
Southern Rocky Mountains / Montañas Rocosas del Sur	4 783.10	+59.7	+68.3	+90.9	+4 347.8	+51.3	+102.3	+167.2	+7 997.3
Colorado Plateau / Meseta de Colorado	23 117.70	-17.3	-35.0	-28.8	-6 657.9	-46.1	-34.3	-35.2	-8 137.4
Upper Gila Mountains / Montañas Superiores de Gila	5 351.40	-1.4	-2.9	-8.4	-449.5	-2.1	-7.0	-8.7	-465.6
Basin and Range-West / Cuenca y Cordillera del Oeste	6 575.20	-4.2	-21.1	-43.0	-2 827.3	-17.2	-47.3	-49.0	-3 221.8
Basin and Range-East / Cuenca y Cordillera del Este	14 724.00	-34.6	-49.5	-63.9	-9 408.6	-29.0	-57.2	-66.1	-9 732.6
Sierra Madre Occidental	20 751.20	-15.9	-39.1	-54.4	-11 288.7	-21.1	-50.6	-65.0	-13 488.3
Sierra Madre Oriental	11 368.10	-61.5	-83.5	-87.5	-9 947.1	-56.1	-84.9	-96.4	-10 958.8
Transversal Neovolcanic Belt / Eje Neovolcánico Transversal	9 071.40	-38.1	-51.9	-55.7	-5 052.8	-38.2	-55.9	-75.3	-6 830.8

Future scenarios: 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050) and 2061-2080 (2070).  
 Escenarios futuros: 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050) and 2061-2080 (2070).

the Sierra Madre Occidental, west of the Sierra Madre Oriental and scattered over the Transverse Neovolcanic Belt in Mexico.

### Bioclimatic tolerance

The predictive yield of the model was higher using all evaluation metrics, showing the bioclimatic requirements of the Mexican Spotted Owl. Response curves and Jackknife tests identified the most important bioclimatic variables, which define the potential distribution of the bird. This subspecies shows tolerance to temperatures  $>5$  °C but decreases to a mean temperature of 22 °C during the warmest month and, although it tolerates varying levels of precipitation (Salazar-Borunda et al., 2021b), it prefers areas with 200 to 250 mm in the wettest month, suggesting a link between relatively low temperatures and precipitation. This behavior may be associated with intrinsic mechanisms of thermoregulation and energy costs (Ganey, Ward, Rawlinson, Kyle, & Jonnes, 2020) and is consistent with field studies (Palma-Cancino et al., 2014; Silva-Piña et al., 2018) and previous models (Ganey et al., 2020; Palma-Cancino et al., 2020; Salazar-Borunda et al., 2022) that associate this raptor with mature forests in the U.S. and Mexico.

### Future distribution

Climate change will undoubtedly continue to affect the natural distribution of bird species (Huntley et al., 2006). This effect will likely vary with current conservation condition, location, and ecology (Møller, Fielder, & Berthold, 2006). In this study, models predicted changes in the distribution range of the Mexican spotted owl over time, which do not represent significant changes for current populations; however, the loss of areas of bioclimatic suitability begins in 2030 and increases in 2041 and, therefore, represents a threat. Models showed a reduction in Mexico's EMU's, especially in the Sierra Madre Oriental. Despite this, the remaining areas of suitability are restricted to the areas of historical distribution.

Changes in climate that affect the areas of suitability for the Mexican spotted owl and its survival have to do with physiology (Ganey et al., 2020), fecundity, abundance, and composition of prey communities (Franklin, Anderson, Gutierrez, & Burnham, 2000). These changes may modify the structure and composition of the mixed conifer forests in which the bird is naturally distributed (Gutiérrez & Trejo, 2014).

The results may be useful for monitoring and conservation of Mexican spotted owl populations; however, this study used few records of the subspecies ( $n = 155$ ), so it is likely that this sample

Rocosas del Sur, al norte de su distribución histórica, siendo la única EMU que ganó espacio bioclimático idóneo (51.3 a 167.2 %) en todos los periodos.

### Discusión

Las agencias gubernamentales evalúan los efectos del cambio climático sobre el rango geográfico de especies sensibles (SEMARNAT, 2010; USFWS, 2012); para ello, utilizan los modelos de distribución de especies, los cuales contribuyen en los planes de conservación (Guisan et al., 2013). Aunque el uso exclusivo de variables bioclimáticas pudo simplificar los patrones biogeográficos del búho manchado mexicano (Dallas, Decker, & Hastings, 2017; Salazar-Borunda et al., 2021b), las áreas de idoneidad bioclimática predichas coinciden con las áreas de distribución actual (Salazar-Borunda, Martínez-Guerrero, Tarango-Arámula, López-Serrano, & Pereda-Solís, 2022; USFWS, 2012). Al respecto, las áreas de idoneidad bioclimática más adecuadas para la permanencia del ave son mayores en el centro de las Cordilleras y Cuencas del Este y Oeste, y Montañas Superiores de Gila en EE. UU., y al centro de la Sierra Madre Occidental, al oeste de la Sierra Madre Oriental y dispersas sobre el Eje Neovolcánico Transversal en México.

### Tolerancia bioclimática

El rendimiento predictivo del modelo fue mayor utilizando todas las métricas de evaluación, demostrando los requerimientos bioclimáticos del búho manchado mexicano. Las curvas de respuesta y pruebas de Jackknife identificaron las variables bioclimáticas más importantes, las cuales definen la distribución potencial del ave. Esta subespecie muestra tolerancia a temperaturas  $>5$  °C, pero disminuye a una temperatura media de 22 °C durante el mes más cálido y, aunque soporta niveles diversos de precipitación (Salazar-Borunda et al., 2021b), prefiere áreas con 200 a 250 mm en el mes más húmedo, lo que sugiere un vínculo entre las temperaturas relativamente bajas y la precipitación. Este comportamiento puede asociarse a mecanismos intrínsecos de termorregulación y gastos de energía (Ganey, Ward, Rawlinson, Kyle, & Jonnes, 2020) y es consistente con estudios de campo (Palma-Cancino et al., 2014; Silva-Piña et al., 2018) y modelos previos (Ganey et al., 2020; Palma-Cancino et al., 2020; Salazar-Borunda et al., 2022) que asocian a esta rapaz con los bosques maduros de EE. UU. y México.

### Distribución futura

Sin duda, el cambio climático continuará afectando la distribución natural de las especies de aves (Huntley et al., 2006). Esta afectación probablemente variará con el estado actual de conservación, ubicación y ecología

size compromised the accuracy of the model (Sagarin & Gaines, 2002; Salazar-Borunda et al., 2021b). The potential distribution of the Mexican spotted owl, generated in this study, is a first approximation that shows drastic effects of climate change on the suitable areas for this species in all the EMU's. In this research, only five bioclimatic variables were used; however, in future studies, to obtain greater accuracy in prediction, these distribution models should also consider more specific variables such as topographic (Meineri & Hylander, 2017), vegetation (Pearson & Dawson, 2003), biotic interactions with prey (Wisz et al., 2013), potential competitors (*Strix varia*; Peterson & Robins, 2003) or human pressures (Engler et al., 2017). It will also be necessary to increase the number of records and project the model to larger geographic areas.

### Conclusion

This study represents the first effort to define the effect of climate change on the potential distribution of the Mexican Spotted Owl. Predictive models of historical and future potential distribution, under two climate change scenarios, describe a gradual and steady decrease in areas of bioclimatic suitability for the bird and show new, more suitable bioclimatic sites north of its historical distribution, for example, in the Southern Rocky Mountains. Although losses of potential distribution areas for the Mexican spotted owl are accentuated after 2041, it is clear that climate change is already a threat to this bird of prey. In this study, only bioclimatic variables were used; therefore, future studies should include more specific variables such as topography, vegetation, biotic interactions with prey, potential competitors, and the effect of anthropogenic activities.

### Acknowledgments

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia and Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera of the Universidad Juárez del Estado de Durango and the Colegio de Postgraduados. Also thank to Joseph L. Ganey, Ph.D. and the reviewers whose comments substantially enriched this manuscript.

### End of English version

### References / Referencias

Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541–545. doi: 10.1111/ecog.01132

(Møller, Fielder, & Berthold, 2006). En este estudio, los modelos predijeron cambios en el rango de distribución del búho manchado mexicano a través del tiempo, los cuales no representan cambios significativos para las poblaciones actuales; sin embargo, la pérdida de áreas de idoneidad bioclimática inicia en el año 2030 e incrementa en el 2041 y, por lo tanto, representa una amenaza. Los modelos mostraron reducción de las EMU de México, especialmente en la Sierra Madre Oriental. A pesar de ello, las áreas de idoneidad remanentes se circunscriben a las áreas de su distribución histórica.

Los cambios en el clima que afectan las áreas de idoneidad para el búho manchado mexicano y su supervivencia tienen que ver con la fisiología (Ganey et al., 2020), fecundidad, abundancia y composición de las comunidades de presas (Franklin, Anderson, Gutierrez, & Burnham, 2000). Estos cambios pueden modificar la estructura y composición de los bosques mixtos de coníferas en los que el ave se distribuye naturalmente (Gutiérrez & Trejo, 2014).

Los resultados pueden ser de utilidad para el monitoreo y conservación de las poblaciones del búho manchado mexicano; sin embargo, en este trabajo se utilizaron pocos registros de la subespecie ( $n = 155$ ), por lo que es probable que este tamaño de muestra haya comprometido la precisión del modelo (Sagarin & Gaines, 2002; Salazar-Borunda et al., 2021b). La distribución potencial del búho manchado mexicano, generada en este estudio, es una primera aproximación que muestra efectos drásticos del cambio climático sobre las áreas idóneas para esta especie en todas las EMU. En este trabajo se utilizaron únicamente cinco variables bioclimáticas; sin embargo, en estudios futuros, para obtener mayor exactitud en la predicción, estos modelos de distribución también deberán tomar en cuenta variables más específicas como las topográficas (Meineri & Hylander, 2017), de vegetación (Pearson & Dawson, 2003), las interacciones bióticas con presas (Wisz et al., 2013), competidores potenciales (*Strix varia*; Peterson & Robins, 2003) o presiones humanas (Engler et al., 2017). Asimismo, será necesario aumentar el número de registros y proyectar el modelo hacia áreas geográficas más extensas.

### Conclusión

Este estudio constituye un esfuerzo pionero para definir el efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del búho manchado mexicano. Los modelos de predicción de la distribución potencial histórica y futura, bajo dos escenarios de cambio climático, describen disminución paulatina y constante de áreas de idoneidad bioclimática del ave y muestran espacios bioclimáticos nuevos más adecuados al norte de su distribución histórica; por ejemplo, en las Montañas

- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Gomez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R*. Springer.
- BirdLife International. (2020). *Strix occidentalis*. The IUCN Red list of threatened species 2020. doi: 10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T22689089A180937862.en
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemuller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024–1026. doi: 10.1126/science.1206432
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio, O. L. (2019). kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7:e6281. doi: 10.7717/peerj.6281
- Dallas, T., Decker, R. R., & Hastings, A. (2017). Species are not most abundant in the centre of their geographic range or climatic niche. *Ecology Letters*, 20(12), 1526–1533. doi: 10.1111/ele.12860
- De Alba, E., & Reyes, M. E. (1998). *Contexto físico: La diversidad biológica de México estudio de país*. México: CONABIO. <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/divBiolMexEPais1.pdf>
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... Zimmerman, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129–151. doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x
- Engler, J. O., Stiels, D., Schidelko, K., Strubbe, D., Quillfeldt, P., & Brambilla, M. (2017). Avian SDMs: current state, challenges, and opportunities. *Journal of Avian Biology*, 48(12), 1483–1504. doi: 10.1111/jav.01248
- Escobar, L. E., Lira, N., Medina, V., & Peterson, A. T. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9(1), 221–229. doi: 10.4081/gh.2014.19
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. doi: 10.1002/joc.5086
- Franklin, A. B., Anderson, D. R., Gutierrez, R. J., & Burnham, K. P. (2000). Climate, habitat quality, and fitness in northern spotted owl populations in northwestern California. *Ecological Monographs*, 70(4), 539–590. doi: 10.1890/0012-9615(2000)070[0539:CHQAFI]2.0.CO;2
- Franklin, J. (2009). *Mapping species distributions*. USA: Cambridge University Press.
- Ganey, J. L., Ward Jr, J. P., Rawlinson, T. A., Kyle, S. C., & Jonnes, R. S. (2020). Annual climate in Mexican spotted owl habitat in the Sacramento Mountains, New Mexico: implications for responding to climate change. *Journal of Field Ornithology*, 91(3), 225–240. doi: 10.1111/jfo.12337
- Rocosas del Sur. Aunque las pérdidas de áreas de distribución potencial del búho manchado mexicano se acentúan a partir del 2041, es claro que el cambio climático ya es una amenaza para esta ave rapaz. En este estudio se utilizaron únicamente variables bioclimáticas, por lo que, en estudios futuros se recomienda la inclusión de variables más específicas como las topográficas, de vegetación, las interacciones bióticas con presas, competidores potenciales y el efecto de actividades antrópicas.
- Agradecimientos**
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia e Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera de la UJED y al Colegio de Postgraduados. Al Dr. Joseph L. Ganey y a los revisores cuyas observaciones enriquecieron sustancialmente el manuscrito.
- Fin de la versión en español**
- change. *Journal of Field Ornithology*, 91(3), 225–240. doi: 10.1111/jfo.12337
- Ganey, J. L. (2004). Thermal regimes of Mexican spotted owl nest stands. *Southwestern Naturalist*, 49(4), 478–486. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3672405>
- Garza, H. A. (2018). Situación actual de búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) y de los Strigiformes de la reserva de la Biosfera La Michilía. Retrieved from <https://www.snib.mx/iptconabio/resource?r=SNIB-H305&v=1.3>
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2019). *Strix occidentalis* subsp. *lucida* (Nelson, 1903). GBIF backbone taxonomy. Checklist dataset. doi: 10.15468/39omei
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J. B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, R. P., Tulloch, A. T., ... Buckley, M. Y. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, 16(12), 1424–1435. doi: 10.1111/ele.12189
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. doi: 10.7550/rmb.37737
- Huntley, B., Collingham, Y. C., Green, R. E., Hilton, G. M., Rahbek, C., & Willis, S. G. (2006). Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. *Ibis*, 148(s1), 8–28. doi: 10.1111/j.1474-919X.2006.00523.x
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Referencias geográficas y extensión territorial de México*. México: Author.
- Keywan R., van Vuuren, D. P., Krieglner, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy,



- land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Krishnan, A. (2021). Lessons across scales: molecular ecology and wildlife conservation. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101, 117–123. doi: 10.1007/s41745-021-00232-6
- Lawler, J. J., Wiersma, Y. F., & Huettman, F. (2011). Predictive species and habitat modeling in landscape ecology. Drew, C. A., Wiersma, Y. F., & F. Huettmann (Eds.), *Using species distribution models for conservation planning and ecological forecasting* (pp. 271–290). Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-7390-0
- Meineri, E., & Hylander, K. (2017). Fine-grain, largedomain climate models based on climate station and comprehensive topographic information improve microrefugia detection. *Ecography*, 40(8), 1003–1013. doi: 10.1111/ecog.02494
- Méndez, E. F. M., Méndez, G. J., & Cerano, P. J. (2020). Distribución actual y potencial de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins bajo dos escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques*, 26(2), e2622002. doi: 10.21829/myb.2020.2622002
- Møller, A. P., Fielder, W., & Berthold, P. (2006). *Birds and climate change*. UK: Elsevier.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2021). National Center for Environmental Information. US Federal Government. Retrieved from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/>
- Palma-Cancino, D. Y., Tarango-Arambula, L. A., Ugalde-Ledezma, S., Alcántara-Carbajal, J. L., Ángeles-Pérez, G., Ramírez-Valverde, G., & Martínez-Montoya, J. L. (2014). Hábitat del tecolote moteado mexicano (*Strix occidentalis lucida*) en Tlachichila, Zacatecas, México. *Agro Productividad*, 7(4), 3–9. Retrieved from <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/528>
- Palma-Cancino, D. Y., Tarango-Arambula, L. A., Ugalde-Ledezma, S., Alcántara-Carbajal, J. L., Olmos-Oropeza, G., Ángeles-Pérez, G., & Rincón-Ramírez, J. A. (2020). Distribución potencial del tecolote moteado mexicano (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903) en Aguascalientes, Durango, Jalisco y Zacatecas México. *Agro Productividad*, 12(1), 23–28. doi: 10.32854/agrop.vi0.1563
- Parnesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37–42. doi: 10.1038/nature01286
- Pearce, J. L., & Boyce, M. S. (2006). Modelling distribution and abundance with presence-only data. *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 405–412. doi: 10.1111/j.1365-2664.2005.01112.x
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimatic envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12(5), 361–371. doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x
- Pebesma, E. J., & Bivand, R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in R. R News. Retrieved from [https://cran.r-project.org/web/packages/sp/vignettes/intro\\_sp.pdf](https://cran.r-project.org/web/packages/sp/vignettes/intro_sp.pdf)
- Peterson, A. T., & Robins, C. R. (2003). Using ecological niche modeling to predict barred owl invasions with implications for spotted owl conservation. *Conservation Biology*, 17(4), 1161–1165. doi: 10.1046/j.1523-1739.2003.02206.x
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Raxworthy, C. J., Martínez-Meyer, E., Horning, N., Nussbaum, R. A., Schneider, G. E., Ortega-Huerta, M. A., & Peterson, A. T. (2003). Predicting distributions of known and unknown reptile species in Madagascar. *Nature*, 426, 837–841. doi: 10.1038/nature02205
- Sagarin, R. D., & Gaines, S. D. (2002). The ‘abundant centre’ distribution: to what extent is it a biogeographical rule? *Ecology Letters*, 5(1), 137–147. doi: 10.1046/j.1461-0248.2002.00297.x
- Salazar-Borunda, M. A., Martínez-Guerrero, J. H., Tarango-Arambula, L. A., Pereda-Solís, M. E., & López-Serrano, P. M. (2020). Avances científicos del búho manchado mexicano (*Strix occidentalis lucida* Nelson 1903). *Agro Productividad*, 13(6), 43–48. doi: 10.32854/agrop.vi.1681
- Salazar-Borunda, M. A., Martínez-Guerrero, J. H., Tarango-Arambula, L. A., López-Serrano, P. M., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Distribution modeling of mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) in Mexico. *Journal of Raptor Research*, 56(1), 65–74. doi: 10.3356/JRR-20-114
- Salazar-Borunda, M. A., Tarango-Arambula, L. A., López-Serrano, P. M., Chávez-Simental, J. A., Olmos-Oropeza, G., Martínez-Guerrero, J. H., & Pereda-Solís, M. E. (2021). Realized ecological niche of the mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*) in Mexico. *Agro Productividad*, 14(6), 3–9 doi: 10.32854/agrop.v14i6.2020
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). 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. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5173091](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091)
- Silva-Piña, M. J., Tarango-Arambula, L. A., Clemente-Sánchez, F., Cortez-Romero, C., Velázquez-Martínez, A., Rafael-Valdez, J., & Ugalde-Lezama, S. (2018). Características del hábitat de sitios de descanso del búho manchado (*Strix occidentalis lucida*) en la Sierra Madre Occidental, México. *Huitzil*, 19(2), 141–156. doi:

- 10.28947/hrmo.2018.19.2.319
- Soberón, J., Osorio-Olvera, I., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437–441. doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.011
- U.S. Geological Survey (USGS). (2021). Geologic maps of US states US Federal Government. Retrieved from <https://mrdata.usgs.gov/geology/state/map-us.html>
- U.S. Fish and Wildlife Service (USFWS). (2012). Final recovery plan of the Mexican spotted owl (*Strix occidentalis lucida*), First Revision. U. S. Fish and Wildlife Service. Retrieved from <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/45043#:~:text=The%20Mexican%20spotted%20owl%20meets,construction%20or%20other%20economic%20activities>
- VanDerWal, J., Murphy, H. T., Kutt, A. S., Perkins, G. C., Bateman, B. L., Perry, J. J., & Reside, A. E. (2013). Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change*, 3, 239–243. doi: 10.1038/nclimate1688
- Wan, H. Y., Ganey, J. I., Vojta, C. D., & Cushman, S. A. (2018). Managing emerging threats to spotted owls. *The Journal of Wildlife Management*, 82(4), 682–697. doi: 10.1002/jwmg.21423
- Warren, D. L., Glor, R. E., & Turelli, M. (2010). ENMTools: a toolbox for comparative studies of environmental niche models. *Ecography*, 33(3), 607–611. doi: 10.1111/j.1600-0587.2009.06142.x
- Willey, D. W., & Van Riper, C. (2014). Home range characteristics of Mexican spotted owls in the Rincon Mountains, Arizona. *The Wilson Journal of Ornithology*, 126(1), 53–59. doi: 10.1676/13-029.1
- Wisn, M. S., Pottier, J., Kissling, W. D., Pellissier, I., Lenoir, J., Damgaard, C. F., .... Heikkinen, R. K. (2013). The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*, 88(1), 15–30. doi: 10.1111/j.1469-185X.2012.00235.x