



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA

RIESGO DE EXTINCIÓN DEL COLIBRÍ
COQUETA DE ATOYAC *Lophornis brachylophus*
(AVES: TROCHILIDAE) EN ESCENARIOS
FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y
USO DE SUELO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

P R E S E N T A

JENNIFER VARGAS NERI

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DAVID ALEXANDER PRIETO

TORRES.



LOS REYES IZTACALA, TLALNEPANTLA, ESTADO DE MÉXICO, 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo del Proyecto PAPIIT IN221920 de la DGAPA-UNAM y del Proyecto “*Consecuencias del cambio climático global sobre las interacciones ecológicas como procesos ecológicos clave en el mantenimiento de la integridad de los ecosistemas*” del PINCC-UNAM



Dirección General de Asuntos
del Personal Académico



Agradecimientos

A mi familia...

A mi madre, la mujer que más admiro, a mi padre, mi mejor amigo. Gracias por todo el apoyo y amor incondicional que me han brindado, por ayudarme a levantar en los momentos difíciles, por enseñarme que nada cae del cielo, pero con esfuerzo y perseverancia puedes conseguir todo lo que te propongas. Gracias por siempre creer en mí.

A mi hermano, por todo el apoyo y consejos que me has brindado, por estar siempre a mi lado, por ayudarme a instalar y desinstalar programas, por ser la luz de mi vida como tú dices.

A mi tía mini, por todas las veces que entraste en silencio y me dejaste un plato de comida en la mesa.

A mi segunda familia...

A Dianita, Ale, Mariana, Fer, Regi, Sandy, Ale, kike, Lili y Mily por todo su apoyo, sus consejos, regaños, por el siempre alentarme a seguir adelante, por todas las veces en las que hemos llorado de tanta risa o de tristeza. Por todos y cada uno de los momentos que hemos vivido juntos, gracias por su amistad sin condiciones, por ser parte esencial en mi vida, sin ustedes nada sería lo mismo.

A Rosalba, por todas las veces que nos sentamos a platicar de la vida, por compartirme tus consejos y enseñarme una nueva forma de ver el mundo. Sin ti, elaborar una tesis habría sido uno proceso completamente diferente.

A mi director de tesis, el Dr. David, gracias infinitas por transmitirme sus conocimientos, por su tiempo, paciencia, apoyo y comprensión. Por sus consejos, por todas y cada una de las oportunidades recibidas en el transcurso de la realización de este proyecto, y sobre todo gracias por aceptarme como su estudiante y confiar en mí.

A la Dra. Coro, porque fue por usted que me adentré en el mundo de los colibríes, me enamoré de ellos y en el trascurso de aprender a estudiarlos conocí a personas maravillosas en la cantera y en IEMS 4, quienes desde el primer momento con todo gusto me compartieron sus conocimientos.

A todos ustedes ¡GRACIAS!

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
HIPÓTESIS	6
OBJETIVOS	7
METODOLOGÍA.....	7
1. Área de estudio.	7
2. Registros históricos de ocurrencia de <i>Lophornis brachylophus</i>	9
3. Información climática y selección de variables.	9
4. Modelos de nicho ecológico y distribución potencial de la especie.	11
5. Análisis espaciales: Impactos del cambio climático, uso de suelo y áreas protegidas.	14
6. Perfil climático de los registros históricos de <i>Lophornis brachylophus</i>	16
RESULTADOS	16
1. Distribución actual del colibrí Coqueta de Atoyac.	16
2. Distribución potencial del colibrí Coqueta de Atoyac en el futuro.	18
3. Perfil climático histórico de <i>Lophornis brachylophus</i>	22
DISCUSIÓN.....	24
1. Distribución y estado actual de <i>Lophornis brachylophus</i>	24
2. Impactos del cambio climático global.	25
3. Perspectivas de Conservación.....	28
CONCLUSIONES.....	29
BIBLIOGRAFÍA	30

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Individuos macho (izquierda) y hembra (derecha) del colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* 3
- Figura 2.** Ubicación del estado de Guerrero. Los tonos gris obscuro representan las elevaciones (msnm)..... 8
- Figura 3.** Mapas mostrando los patrones de distribución geográfica potencial de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) para los escenarios climáticos y uso de suelo del presente. Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo extrapolación, pero no campling; y (c) permitiendo tanto la extrapolación como el campling 18
- Figura 4.** Mapas de distribución potencial geográfica de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) para los escenarios climáticos y uso de suelo del futuro (año 2050), considerando dos valores de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5) e hipótesis de dispersión de la especie. Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo tanto la extrapolación como el campling; (c) permitiendo la extrapolación, pero no el campling. 20
- Figura 5.** Resultados obtenidos para los análisis MOP y la identificación de condiciones ambientales no análogas para el año 2050 considerando dos vías de concentración representativas de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5). Las áreas negras dentro de los mapas representan aquellos sitios, donde una o más variables ambientales están fuera del rango presente en los datos de entrenamiento. Los valores de similitud con M para los cálculos de MOP se estimaron considerando el promedio de cuatro modelos climáticos globales. Los polígonos rojos representan las áreas de distribución potenciales predichas por los modelos para cada escenario (Figura 3). Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo extrapolación, pero no campling; y (c) permitiendo tanto la extrapolación como el campling 21
- Figura 6.** Resultados obtenidos para los análisis PON, basados en tres periodos <2000 en color rojo, 2001 – 2010 color verde y 2011-2019 en color azul. Los análisis fueron obtenidos mediante un análisis ANOVA de una vía. Los asteriscos de color rojo en los diagramas de caja representan las variables que estadísticamente no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las condiciones climáticas utilizadas por la especie a través del tiempo.....23

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables bioclimáticas utilizadas para el desarrollo de los modelos de nicho ecológico y distribución potencial de <i>Lophornis brachylophus</i> . Una explicación detallada de estas variables y su interpretación se encuentra disponible en el portal web del proyecto WorldClim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005) y en Cuervo-Robayo <i>et al.</i> , (2014).....	10
Tabla 2. Selección de variables ambientales no correlacionadas con sus respectivas contribuciones para el modelo de distribución de la Coqueta de Atoyac (<i>Lophornis brachylophus</i>) en este estudio.....	17
Tabla 3. Patrones de distribución geográfica potencial presente y futuros del colibrí Coqueta de Atoyac (<i>Lophornis brachylophus</i>). Los resultados aquí mostrados para el futuro están basados en los mapas finales obtenidos al promediar las predicciones de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) y cuatro modelos generales de circulación (CCSM4, MIROC5, ACCESS y HadGEM2-ES) para el año 2050. Para cada enfoque de modelado utilizado se muestra la proporción de cambio predicha por efecto del cambio climático global y/o deforestación, el porcentaje de áreas nuevas colonizadas estimadas, la proporción de áreas con vegetación intacta, la proporción de áreas protegidas estimadas y el promedio de elevación	19
Tabla 4. Valores promedios (mínimo-máximo) de las variables bioclimáticas para la distribución actual de la Coqueta de Atoyac (<i>Lophornis brachylophus</i>) y las diferencias respecto a las áreas predichas como pérdida en el futuro (año 2050) considerando los tres enfoques de modelado aquí utilizados.....	22

RESUMEN

El colibrí Coqueta de Atoyac (Aves: Trochilidae: *Lophornis brachylophus*) es un ave endémica del estado de Guerrero, considerada como una especie en peligro crítico de extinción debido principalmente a la fragmentación y pérdida de su hábitat. Sin embargo, poco se ha estudiado sobre su distribución considerando los potenciales efectos del cambio climático. Por ello, en este estudio se evaluó el riesgo de extinción de esta emblemática ave bajo escenarios de cambio climático global y uso de suelo para el año 2050, con la finalidad de identificar potenciales áreas de conservación para su protección a largo plazo. Utilizando el enfoque de modelado de nicho ecológico (con el programa Maxent 3.4.3 y en el paquete “*kuenm*” del programa estadístico R) se estimaron las áreas de distribución potencial de *L. brachylophus* en el presente y el futuro, considerando dos escenarios alternativos de dispersión: contigua vs. no dispersión. Además, para cada escenario climático, se calculó la proporción de vegetación intacta y áreas dentro del actual sistema de áreas naturales protegidas (ANPs). Los resultados mostraron, en promedio, una extensión de $\sim 611\text{km}^2$ de áreas de idoneidad climática para la distribución potencial en el presente de *L. brachylophus*, las cuales incluyen un 63.5% de vegetación intacta. Estas áreas podrían experimentar reducciones, en promedio, de un 38.12% (bajo el supuesto de que la especie podrá dispersarse) y 47.92% (ante una nula capacidad de dispersión) debido al cambio climático en el 2050. Estos cambios en las áreas de distribución se relacionan con el aumento de la temperatura media anual ($>2.1\text{ }^\circ\text{C}$), así como una reducción de la precipitación media anual ($<31\text{ mm}$). No obstante, los mayores grados de reducción ($>50\%$) en el futuro se observaron al combinar el efecto del cambio climático y pérdida de hábitat, incluso al asumir la capacidad de colonizar nuevos espacios. Las selvas cálidas secas y los bosques templados fueron los ecosistemas más importantes en la distribución de esta ave, los cuales en el futuro podrían mostrar reducciones de un 23.4% y 85.6%, respectivamente, de los sitios de distribución para *L. brachylophus*. Desafortunadamente, las ANPs no incluyen las áreas de distribución predichas para la especie, por lo que no son ni serán suficientes para su resguardo a largo plazo. Estos resultados sirven como una guía en el establecimiento de futuros esfuerzos de conservación que permitan reducir los riesgos de extinción de las poblaciones remanentes para esta especie endémica y altamente vulnerable.

ABSTRACT

Short-crested Coquette (Aves: Trochilidae: *Lophornis brachylophus*) is an endemic bird of the state of Guerrero. This hummingbird is considered as critically endangered species mainly due to both fragmentation and loss of habitat. However, few studies have been performed assessing its distribution considering the potential effects of climate change. To address this, we evaluated the risk of extinction of this emblematic bird under future (year 2050) scenarios of global climate and land use changes, identifying potential conservation areas for its long-term protection. Based on ecological niche modeling approach (using the Maxent 3.4.3 software and "kuenm" library in R), we estimated the potential distribution areas in both current and future scenarios, even considering two dispersion assumptions: contiguous *vs.* non-dispersion. Besides, we calculated the proportion of intact vegetation and surface within the current protected areas system (PAs) in each climate scenario. On average, we estimated an extension of ~ 611km² of suitability areas for the current potential distribution of *L. brachylophus*, which included 63.5% of intact vegetation. To future, these suitability areas could experience important reductions, on average of 38.12% (if we assumed that species will be able to disperse) and 47.92% (if we assumed null dispersal capacity). Such changes in ranges were related mainly to the increase in the mean annual temperature (>2.1 °C) and reduction in the mean annual precipitation (<31 mm). However, the greatest degrees of reductions into species ranges were observed due to combining effect of climate change and loss of habitat (i.e., deforestation), showing values of reduction higher than 50% for *L. brachylophus*' range even under the assumption that species will colonize new spaces in the future. Both dry and temperate forests were the most important ecosystems within the potential distribution of this species but showed important reductions (23.4% and 85.63%, respectively) for the distribution of *L. brachylophus* in the future. Unfortunately, the current Mexican PAs do not include the predicted distribution areas for the species, so they are not and will not be sufficient for its long-term protection. These novel results represent an important guide to establish future conservation efforts reducing the extinction risk for the remaining populations for this endemic and highly vulnerable species.

INTRODUCCIÓN

El colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* (Aves: Apodiformes: Trochilidae), es una especie endémica de México que se distribuye en la sierra Atoyac de Álvarez en el Estado de Guerrero, al oeste del país. Su distribución abarca diversos ecosistemas, incluyendo los bosques de encino, encino-pino y bosques mesófilos de montaña, en un rango altitudinal que va desde los 900 a los 1,800 msnm (Arizmendi y Berlanga, 2014). Los organismos de esta especie se caracterizan por su pequeño tamaño, tener el pico negro y recto, así como un claro patrón de dimorfismos sexual (Fig. 1). El macho posee una cresta filamentosa que mide entre 1-2 cm, es de color canela, sus plumas más largas de la cresta tienen la punta de color verde; además su dorso es color verde esmeralda y tiene una línea horizontal blanca en la rabadilla y de ahí a la cola con un color morado-bronce. Su cola es redondeada; las dos plumas centrales son verdes y el resto de color canela con la punta negra (Arizmendi y Berlanga, 2014). Las hembras, por el contrario, no poseen una cresta y la garganta y vientre son de color canela pálido, su corona es canela y el resto del dorso verde pálido. Además, su cola tiene las dos plumas centrales verdes con las puntas canela (Arizmendi y Berlanga, 2014).



Figura 1. Individuos macho (izquierda) y hembra (derecha) del colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus*. Imágenes tomadas de Arizmendi y Berlanga (2014), y de eBirds [https://ebird.org/species/shccoq?siteLanguage=es_MX].

Lophornis brachylophus, como parte del grupo de aves nectarívoras (López-Segoviano 2007), desempeña un importante papel dentro de las funciones ecológicas (p.ej. polinización) dentro de los ecosistemas (Şekercioğlu *et al.*, 2012). Sin embargo, a pesar de su importancia y ser considerada como una especie bandera en términos de conservación (Downer, 1996), actualmente se le considera, tanto por la Unión Internacional para la Conservación (IUCN) como por la Norma Oficial Mexicana 059, como una especie en peligro crítico de extinción (IUCN, 2018; SEMERNAT, 2010). De hecho, a pesar de que el estado de Guerrero posee una de las avifaunas más ricas de México; hoy en día sus hábitats constantemente son modificados por cambios en el uso de suelo y la escasa protección a las Áreas Naturales Protegidas (Sierra-Morales *et al.*, 2016). Desafortunadamente, las características biológicas de este colibrí, tales como su distribución geográfica restringida y la baja tasa reproductiva, hacen esta especie vulnerable a la fragmentación y pérdida del hábitat (Sierra-Morales *et al.*, 2016), así como al cambio climático. No obstante, ha sido una especie poco estudiada en varios de sus aspectos biológicos (Cavelier *et al.*, 2011). Además, la distribución de la especie no ha sido evaluada desde una perspectiva ecológica y geográfica considerando los efectos de cambio climático, los cuales podrían tener importantes implicaciones para su conservación (Prieto-Torres *et al.*, 2020).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC; 2014, p. 129), este se define como una “*variación del estado del clima identificable... en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos*”. Una de las consecuencias más estudiadas de estas variaciones en el clima es el hecho de que tales alteraciones han modificado las condiciones (hacia entornos más cálidos y secos) de la superficie terrestre (Buytaert *et al.*, 2011). Durante el último siglo se ha registrado un aumento de 0.6 °C en la temperatura media global (Root *et al.*, 2003) y esta es una tendencia que continuará (a ritmos más acelerados) en el futuro, lo cual consecuentemente impactará negativamente en la biodiversidad (IPCC, 2014). De hecho, en los últimos años el cambio climático global ha sido considerado una de las principales amenazas para las especies y los ecosistemas que estas habitan (Parry *et al.*, 2007). “*Se espera que el cambio climático reduzca el número de especies a nivel mundial*” (Menéndez *et al.*, 2006, p. 1465). Por ello, el desarrollo de investigaciones enfocadas

en los futuros efectos del cambio climático en la distribución de las especies se ha vuelto un tema prioritario para la conservación, especialmente en Latinoamérica (Pearson *et al.*, 2019).

Actualmente, en términos generales, se reconocen tres potenciales respuestas de las especies a estos escenarios de cambio climático, que abarcan tanto desplazamiento, la adaptación (incluyendo cambios evolutivos y la aclimatación fisiológica), y la extinción de especies (Holt, 1990; Peterson *et al.*, 2002). Si las especies son lo suficientemente móviles podrán realizar un seguimiento geográfico (latitudinal y/o altitudinal) de las condiciones de sus respectivos nichos ecológicos (condiciones ambientales dentro de los cuales son capaces de mantener las poblaciones) para así garantizar su supervivencia (Peterson *et al.*, 2002; Prieto-Torres *et al.*, 2016, 2020). Por otra parte, la adaptación a las condiciones cambiantes y a los paisajes perturbados podría ser el resultado esperado para las especies que tienen una amplia gama de tolerancia fisiológica (Holt, 1990; Feeley *et al.*, 2012). Sin embargo, a falta de capacidades de movilidad y adaptabilidad, la extinción de las poblaciones sería el futuro escenario más probable para las especies (Peterson *et al.*, 2002; Root *et al.*, 2003; Lovejoy & Hannah, 2019).

Estos escenarios de amenazas son particularmente importantes para las especies con bajas capacidades de dispersión y altos niveles de especialización ecológica como lo es el colibrí Coqueta de Atoyac (Thomas *et al.*, 2004; Wilkening *et al.*, 2019; Prieto-Torres *et al.*, 2020; Arizmendi *et al.*, 2021). Por ello, diversas instituciones —como por ejemplo CONABIO, en México— señalan que la sobrevivencia de varias especies de colibríes se encuentra amenazada y son altamente vulnerables tanto al cambio de uso de suelo como al cambio climático global (p.ej. Buermann *et al.*, 2011; Prieto-Torres *et al.*, 2020). En este contexto, se necesitan estudios enfocados a delimitar las áreas de distribución potencial y disponibilidad de los ecosistemas (p.ej. Mota-Vargas y Rojas-Soto, 2012; Ortega-Andrade *et al.*, 2015) para el colibrí Coqueta de Atoyac, esto con el fin de obtener una mejor evaluación de las principales amenazas, estimar los riesgos de extinción e identificar unidades prioritarias de conservación (Sierra-Morales *et al.*, 2016).

Sin embargo, la delimitación de la distribución de una especie es una tarea compleja que involucra varios factores determinantes (ej. condiciones abióticas y bióticas, capacidad de dispersión y adaptación, etc.), que son difíciles de evaluar en el campo (Soberón & Peterson,

2005; Mota-Vargas *et al.*, 2019). Con el fin de lograrlo, varios métodos computacionales han sido desarrollados para estimar áreas de distribución por medio del modelado del nicho ecológico de las especies (Elith *et al.*, 2006; Guisan *et al.*, 2013; Araujo *et al.*, 2019). Estas nuevas tecnologías, en las que se observa un avance acelerado en su aplicabilidad en programas de conservación, son herramientas útiles en la definición de las áreas ambientalmente idóneas para la existencia y distribución de los organismos (Elith & Leathwick, 2009; Elith *et al.*, 2011). Por ello, son ampliamente utilizados en estudios del efecto del cambio climático, la identificación de áreas prioritarias de conservación y el desarrollo de estrategias de protección para las especies (p.ej. Mota-Vargas & Rojas-Soto 2012, Mota-Vargas *et al.*, 2019; Araujo *et al.*, 2019; Prieto-Torres *et al.*, 2020), ya que aportan información valiosa sobre la biogeografía y ecología de los organismos.

En atención a lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tuvo como finalidad analizar los potenciales riesgos de extinción de la especie *Lophornis brachylophus* ante escenarios futuros (año 2050) de cambio climático global y uso de suelo. Este análisis permitió la obtención de información sobre los potenciales cambios en las distribuciones de las especies y sus grados de amenaza, así como un mayor entendimiento al respecto de las dinámicas de respuestas espacio-temporales de la especie y de las necesidades de conservación ante estos escenarios de perturbación ambiental (p.ej. Ortega-Andrade *et al.*, 2015; Atouchi *et al.*, 2020). De esta manera, la realización de este estudio ayuda a comprender la capacidad adaptativa de esta especie e identificar áreas de conservación importantes a proteger para el salvaguardo de esta especie críticamente amenazada.

HIPÓTESIS

Considerando que las modificaciones ambientales (tanto de clima como de cobertura vegetal) son factores que pueden afectar negativamente los patrones de distribución de las especies, especialmente aquellas de rangos geográficos restringidos como es el caso del colibrí Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*), se espera entonces que este tipo de perturbaciones produzcan reducciones drásticas e incluso modificaciones en sus rangos altitudinales de distribución para el futuro cercano (año 2050), incrementando así las posibilidades de escenarios de extinción a corto plazo para esta especie críticamente amenazada.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el riesgo de extinción para el colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* bajo escenarios de cambio climático global y uso de suelo para el año 2050, identificando potenciales áreas de conservación para la protección a largo plazo de esta especie.

Objetivos particulares

- Reconstruir, mediante el enfoque de modelo de nicho ecológico, la distribución geográfica potencial del colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* en escenarios climáticos y uso de suelo del presente y futuro (año 2050).
- Analizar los patrones espaciotemporales de distribución geográfica del colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* bajo escenarios climáticos y uso de suelo futuros (año 2050), considerando dos escenarios alternativos de dispersión (“limitada” vs. “no dispersión”) y de emisiones de gases de efecto invernaderos (Pesimista vs. Optimista).
- Identificar áreas climáticamente estables para la distribución geográfica del colibrí Coqueta de Atoyac *Lophornis brachylophus* que puedan ser consideradas como áreas prioritarias de conservación para la protección de esta especie amenazada.

METODOLOGÍA

Área de estudio.

El estado de Guerrero está situado en la parte meridional de la República Mexicana entre los paralelos 16°17'30" N - 18°59'30" N y en los meridianos 98°04'30" W - 102°11'30" (Fig. 2). Cuenta con una superficie de 64,282 km² y ocupa el 3.3% del territorio nacional (Sierra-Morales *et al.*, 2016). Su clima se caracteriza por ser, en su mayor parte, de tipo cálido subhúmedo (82%), seguido por un 9% que es seco y semiseco, un 5% de clima templado subhúmedo, un 3% cálido húmedo y solo un 1% de tipo templado húmedo (INEGI, 2010). La

temperatura media anual es de 25 °C; 18°C es la temperatura mínima promedio, mientras que la máxima es de 32°C.

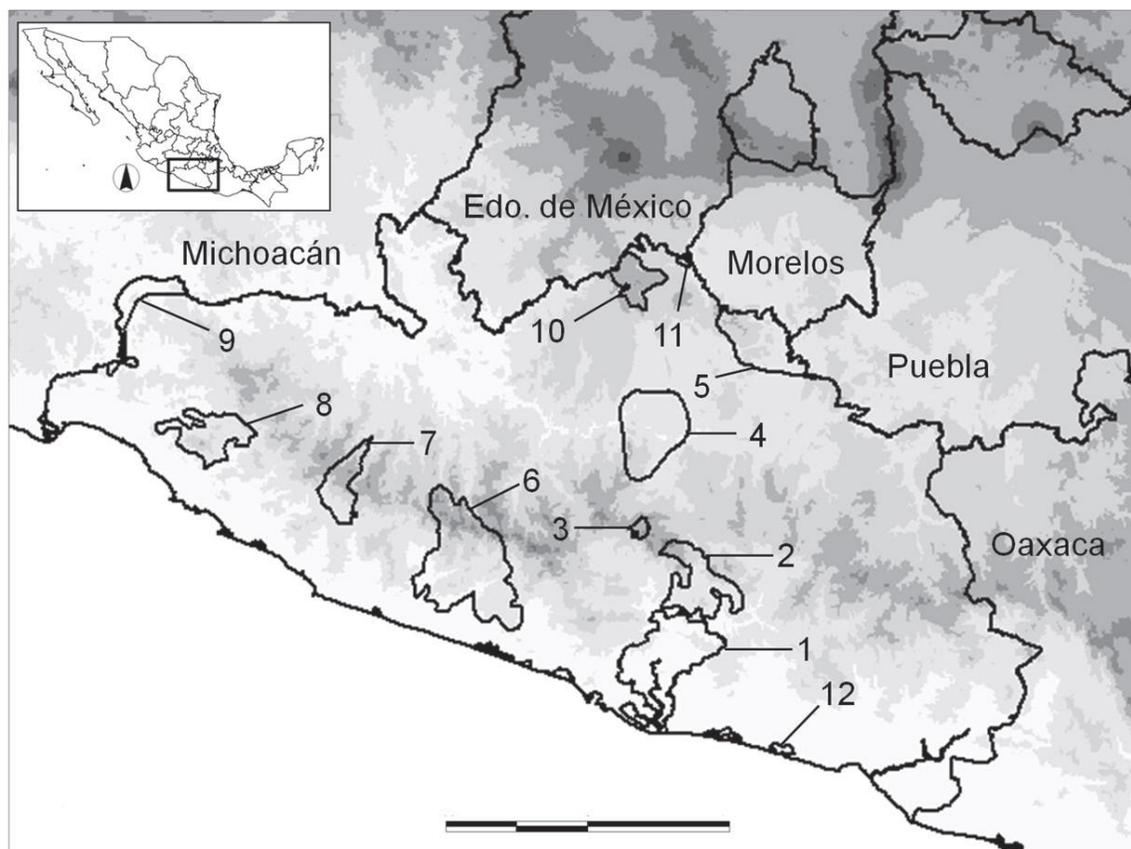


Figura 2. Ubicación del estado de Guerrero. Los tonos gris obscuro representan las elevaciones (msnm) (Tomado de Sierra-Morales *et al.*, [2016]).

Esta es una zona que se caracteriza por estar irrigada por abundantes corrientes superficiales, pues cuenta con 38 ríos, siendo el principal de ellos el río Delicias (que atraviesa la sierra madre del sur) el cual esta alimentado por numerosos afluentes, entre los que destacan el río Golondrinas, Palmitas y Teotepec (Navarro-Sigüenza, 1986). Su orografía es accidentada, teniendo elevaciones que superan los 3,000 msnm (Sierra-Morales *et al.*, 2016). Los principales tipos de vegetación en la entidad son el bosque de pino-encino, bosque de encino, bosque de pino, selva baja caducifolia, bosque mesófilo de montaña, selva mediana subcaducifolia, selva mediana caducifolia, tular, vegetación sabanoide, manglar, y bosque de *Curatella americana* (INEGI, 2010; Sierra-Morales *et al.*, 2016). Además, el estado de Guerrero forma parte de dos provincias biogeográficas, la Sierra Madre del Sur y el Eje volcánico Transversal (INEGI, 2010;

Morrone, 2014), las cuales han fungido como importantes barreras geográficas y ecológicas para la biota presente (Sánchez-González *et al.*, 2008; Prieto-Torres *et al.*, 2019a, 2019b).

Registros históricos de ocurrencia de *Lophornis brachylophus*.

Se realizó una búsqueda de registros en diferentes fuentes de información, incluyendo: (a) bases de datos online de acceso abierto como el portal de la *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF; disponible en: <http://www.gbif.org/species>), Enciclovida (disponible en: <https://enciclovida.mx/>) y eBirds (disponible en: <https://ebird.org/home>); (b) revisión de ejemplares de colección del Museo de Zoología “Alfonso L. Herrera” de la Facultad de Ciencias, UNAM; y (c) literatura especializada sobre la ecología de la especie y la avifauna de la región (p.ej. Freymann & Schuchmann, 2005; Navarro-Sigüenza & Peterson, 2007; Arizmendi, 2016; Santiago-Alvarado *et al.*, 2016; Sierra-Morales *et al.*, 2016; 2019). Las descargas del portal GBIF se realizaron mediante la librería “*rgbif*” (Chamberlain *et al.*, 2019) del programa estadístico R (R-Core Team, 2018).

Adicionalmente, considerando que al no poder verificar personalmente los ejemplares depositados en las bases de datos online se pueden incrementar las fuentes de error en la realización de los modelos, se realizó un proceso de depuración y limpieza individual de los datos (Maldonado *et al.*, 2015). Este proceso de limpieza consistió en: (1) eliminar los registros que no cuenten con coordenadas geográficas, o en su caso que sean ambiguas o de procedencia dudosa; (2) eliminar las ocurrencias que se encuentren repetidas en más de una fuente de datos, conservando solo un registro, teniendo en cuenta como distancia mínima de separación entre puntos de 1km² ; y (3) descartar todos aquellos datos registrados fuera de los rangos geográficos de distribución (es decir, fuera del estado de Guerrero) y altitudinal (900-1,800 msnm) conocido para la especie (BirdLife International, 2018). Todos los datos se trabajaron en formato de grados decimales utilizando el sistema WGS84 como referencia.

Información climática y selección de variables.

La información ambiental utilizada para la elaboración de los modelos de distribución potencial de *L. brachylophus* correspondió al set de variables climáticas de alta resolución para

México desarrolladas por Cuervo-Robayo *et al.* (2014). Este conjunto de variables incluye 19 condiciones o características bioclimáticas actuales de precipitación y temperatura de la superficie terrestre del país (Tabla 1), elaboradas con información a una escala temporal desde 1910 a 2009 (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014).

Tabla 1. Variables bioclimáticas utilizadas para el desarrollo de los modelos de nicho ecológico y distribución potencial de *Lophornis brachylophus*. Una explicación detallada de estas variables y su interpretación se encuentra disponible en el portal web del proyecto WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005) y en Cuervo-Robayo *et al.*, (2014).

BIO 1	Temperatura media anual
BIO 2	Rango diurno medio (media mensual (temperatura máxima – temperatura mínima))
BIO 3	Isotermidad (BIO2/BIO7) (*100)
BIO 4	Estacionalidad en la temperatura (desviación estándar * 100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 7	Rango anual de temperatura (BIO 5-BIO 6)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 9	Temperatura media del cuarto más seco
BIO 10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 11	Temperatura media del cuarto más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación)
BIO 16	Precipitación del cuarto más húmedo
BIO 17	Precipitación del cuarto más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del cuarto más frío

Las variables ambientales para los escenarios climáticos del futuro fueron obtenidas directamente de la página web del proyecto WorldClim (disponible en: <https://www.worldclim.org>), considerando los modelos climáticos CMIP5 propuestos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014). Con la finalidad de evaluar los potenciales cambios de distribución de la especie bajo escenarios climáticos al futuro, se utilizaron dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) para el año 2050, considerando como escenario

“pesimista” al RCP 8.5 (Riahi *et al.*, 2011; IPCC, 2014). Estos escenarios se descargaron considerando la información aportada por los Modelos Generales de Circulación (MGC) de cuatro diferentes laboratorios: el CCSM4 (University of Miami RSMAS, USA), el MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate), el ACCESS (Research Organization and Bureau of Meteorology) y HadGEM2-ES (Met Office Hadley Centre for Climate Change). Estos MGC fueron seleccionados considerando que los mismos han sido referidos como estimaciones de los valores de precipitación en los campos de la zona media atmosférica de los océanos ecuatoriales, y, en consecuencia, como una mejor simulación de los efectos del fenómeno del ENSO, un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico Tropical (Watanabe *et al.*, 2010, Bi *et al.*, 2013). Todos los escenarios climáticos fueron visualizados en el programa QGIS (<https://www.qgis.org/es/site/>) y transformados a formato ASCII “*raster*” (resolución de ~1 km²).

Adicionalmente, con la finalidad de reducir los errores de sobreajuste y los problemas en la colinealidad de las variables (Dormann *et al.*, 2013), se utilizaron dos enfoques estadísticos para la selección de variables: (1) correlación de Pearson ($r < 0.8$) y un valor de inflación de varianza (VIF < 10) mediante las librerías “*corplot*” y “*usdm*” (Weit & Simko, 2017) del programa R, para seleccionar únicamente aquel conjunto particular de variables poco correlacionadas; y (2) un análisis de componentes principales, utilizando la biblioteca R “*ENMGadgets*” (Barve & Barve, 2016), para la obtención de un conjunto de cuatro variables que explican hasta el 95% de la varianza total (ver Hanspach *et al.*, 2011). Este paso es importante ya que la correlación existente entre las variables bioclimáticas puede afectar el adecuado desarrollo de los modelos, obstaculizando de esta manera la correcta caracterización de los nichos ecológicos de las especies (Dormann *et al.*, 2013; Cobos *et al.*, 2019). El set de datos finales con los cuales se efectuó la construcción de los modelos se realizó considerando los valores estadísticos estimados en el paquete “*kuenm*” R (Cobos *et al.*, 2019).

Modelos de nicho ecológico y distribución potencial de la especie.

Para este estudio, se utilizó el algoritmo de máxima entropía en el programa MaxEnt 3.4.3 (Philips *et al.*, 2006) este programa utiliza dos tipos de datos: (1) las localidades donde se ha

registrado la especie (datos de presencia) y (2) las capas digitales de las condiciones ambientales de un área determinada. Con ella, el programa desarrolla un número de iteraciones (relaciones matemáticas que relacionan la información ambiental con los registros de presencia de la especie) que produce un mapa de valores de idoneidad ambiental que van desde cero (no apto) a uno (perfectamente apto) para identificar las potenciales áreas de distribución de las especies en la geografía (Elith *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2006). Se seleccionó MaxEnt como algoritmo a utilizar debido a que se ha demostrado que posee un alto rendimiento predictivo la construcción de los modelos se realiza solo con datos de presencia para las especies (Elith *et al.*, 2011).

Se determinó el área de accesibilidad o dispersión histórica (“M” según Soberon & Peterson, 2005), la cual será utilizada como área de calibración del modelo (Barve *et al.*, 2011). Para establecer esta área “M” (en práctica un polígono con el que se recortarán las capas climáticas) se realizó una intercepción de los puntos de ocurrencia de la especie con el mapa de provincias biogeográficas de México (Morrone *et al.*, 2014) y los ecosistemas terrestres de las ecorregiones propuestas por Olson *et al.*, (2001). Este método supone que la intercepción de estas dos regiones puede definir los límites históricos (evolución) y ecológicos/fisiológicos (dispersión), incluyendo las principales barreras geográficas, los límites de tolerancia y las necesidades a ciertas condiciones abióticas de la especie en el espacio geográfico (p.ej. Peterson *et al.*, 2011; Prieto-Torres *et al.*, 2019a; 2020).

Se utilizó el paquete “*kuenm*” R (Cobos *et al.*, 2019) para realizar el protocolo de calibración y evaluar la complejidad del modelo (Merow *et al.*, 2014). Para esto, primero se ejecutaron modelos utilizando el 75% de los registros de presencia para la calibración del modelo y el 25% restante se utilizó para realizar la evaluación interna bajo diferentes combinaciones del conjunto de variables ambientales (no correlacionadas vs. PCA), los tipos de respuesta del modelo fueron los siguientes (clases de entidad: "L", "Q", "P", "T", "H", "LQ", "LP", "LT", "LH", "QP", "QT", "QH", "PT", "PH", "TH", "LQP", "LQT", "LQH", "LPT", "LPH", "LTH", "QPT", "QPH", "QTH", "PTH", "LQPT", "LQPH", "LQTH", "LPTH", "QPTH" y "LQPTH") y 21 valores de múltiplos de regularización (RM: 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8) (Merow *et al.*, 2014; Cobos *et al.*, 2019). Este paso se realizó con la finalidad de evaluar distintos modelos candidatos y posteriormente seleccionar los mejores basándose en distintos criterios de calidad. Los modelos candidatos se redujeron primeramente

en función de la significancia estadística de la prueba de ROC parcial (Peterson *et al.*, 2008), el criterio de información de Akaike (AICc) (Merow *et al.*, 2014) y la tasa de omisión (<5%) más baja (Anderson *et al.*, 2003).

Los modelos finales fueron desarrollados implementando un valor de 1,000 iteraciones con 10 réplicas cada uno y se proyectaron a escenarios climáticos futuros (recortados geográficamente al área “M” definida) considerando tres enfoques diferentes: (1) sin extrapolación ni campling; (2) permitiendo extrapolación, pero no campling; y (3) permitiendo tanto la extrapolación como el campling. Esto es importante porque las dos últimas opciones permitieron identificar posibles condiciones de hábitats nuevos, basadas en valores extremos de las variables ecológicas que podrían considerarse adecuadas para la especie en los escenarios climáticos futuros (Stohlgren *et al.*, 2001; Elith *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2018). En este sentido, para evaluar la presencia de condiciones climáticas “nuevas” en el futuro en relación con las condiciones actuales (es decir, climas análogos), se calcularon los valores de la prueba de paridad orientada a la movilidad (MOP, por sus siglas en inglés) (Owens *et al.*, 2013). Esto permitió estimar aquellas áreas de distribución potencial estimadas en el futuro que corresponden a una extrapolación estricta del modelo, las cuales corresponderían a zonas de mayor incertidumbre y por lo tanto requieren ser tratadas con suma precaución al interpretar la probabilidad de presencia de la especie (Alkische *et al.*, 2017).

Los formatos logísticos de salida que arroja MaxEnt de cada uno de los modelos (presente vs. futuro) fueron convertidos a valores binarios de presencia-ausencia mediante el uso de un valor de umbral de corte definido como el valor fijo de omisión del 10% de los datos de entrenamiento: “10th percentile training presence (10PTP)”. Este umbral minimiza los errores de comisión (es decir, evita sobrepredecir áreas [falsos positivos]) y es interpretado ecológicamente como el punto en el cual las unidades (en este caso, píxeles) predichas son al menos tan adecuadas como las unidades donde la especie ha sido registrada, rechazando sólo el 10% de los registros de ocurrencia utilizados con los valores más bajos de idoneidad (Liu *et al.*, 2013). El mapa final de distribución potencial en el 2050 fue obtenido mediante la superposición de los mapas binarios de cada MGC y escenario RCP, considerando como áreas de “presencia” a los píxeles donde la mayoría de los modelos predictivos coincidieron (es decir, adecuado en 3 o más modelos = 1 [presencia]). Finalmente, el rendimiento y significancia estadística de los

modelos se evaluó calculando los valores de error de omisión (es decir, sobreajuste) y los valores de la prueba ROC-Parcial (Anderson *et al.*, 2003; Elith *et al.*, 2006, 2011; Peterson *et al.*, 2008).

Análisis espaciales: Impactos del cambio climático, uso de suelo y áreas protegidas.

Luego de identificar las áreas de mayor idoneidad climática para *L. brachylophus* en cada escenario climático analizado, se realizaron cuatro análisis espaciales que incluyen: (1) la evaluación del efecto del cambio climático en la distribución potencial de la especie; (2) la estimación de las áreas climáticamente estables para la especie; (3) la evaluación de la pérdida y fragmentación del hábitat en las áreas potenciales de distribución estimadas para cada escenario; y (4) la estimación del porcentaje de área distribución potencial de la especie incluida dentro de algún área protegida. No obstante, considerando que la capacidad de dispersión de las especies puede afectar directamente el éxito de colonización de nuevas áreas de idoneidad en el futuro (Peterson *et al.*, 2002; Prieto-Torres *et al.*, 2020), en este estudio todos los análisis espaciales fueron desarrollados tomando en cuenta dos potenciales escenarios alternativos de dispersión para *L. brachylophus*. En el primer escenario, “no dispersión”, la estimación de las áreas idóneas de distribución potencial estará dado únicamente por aquellas áreas de coincidencia espacial entre el escenario del presente y el escenario del futuro; mientras que en el escenario de “dispersión contigua” además de considerar estas áreas de coincidencia se incluirán todas aquellas áreas estimadas como idóneas en el escenario futuro que no están en el presente (es decir, áreas nuevas). En ambos casos se asume que la especie no podrá a corto plazo saltar las barreras geográficas definidas por su área “M”, ni consideran las interacciones ecológicas entre especies (como la competencia, la depredación, etc.) como potenciales limitantes en la distribución de los organismos (Peterson *et al.*, 2002; Atauchí *et al.*, 2020).

Para estimar los valores de cambio (ganancia o pérdida) de áreas potenciales de distribución a consecuencia de las modificaciones climáticas en el futuro, se realizó una sumatoria de los mapas binarios de presencia entre los escenarios climáticos analizados (Young *et al.*, 2009). De esta manera, se consideró únicamente como ganancia aquellos casos donde la cantidad de píxeles (área) predicha como idóneos para las áreas de distribución de *L. brachylophus* en el futuro sea mayor a los estimados para el presente. Además, la identificación

de áreas climáticamente estables se realizó siguiendo la metodología propuesta por Terrible *et al.* (2012) y Collevati *et al.* (2013), quienes establecen que estas áreas corresponden únicamente a aquellas regiones de la geografía que son predichas como idóneas para la especie de estudio en todos los escenarios climáticos analizados. La sumatoria de los mapas se realizó con el programa R studio versión 4.0.3.

Por otra parte, considerando que en los últimos años la mancha urbana ha tenido —y tendrá— un fuerte impacto en la modificación y perturbación en el entorno natural (Ruiz *et al.*, 2013), se estimó el efecto de la deforestación y/o pérdida del hábitat en las áreas de idoneidad para la distribución de la especie. Para ello, se utilizó un mapa de cobertura de vegetación terrestre para el presente (Hansen *et al.*, 2013) y para el futuro 2050 (disponible en: <https://www.environmentalgeography.nl/site/datamodels/models/clumondo-model/>; Verburg & Overmars, 2009; Van Asselen & Verburg 2013). Ambos mapas fueron reclasificados en dos categorías: “vegetación intacta” vs. “áreas perturbadas”. Esta última categoría, de acuerdo con la propuesta realizada por Ortega-Andrade *et al.* (2015) y Atauchi *et al.* (2020), agrupará todas aquellas zonas urbanas, bosques secundarios, áreas deforestadas, áreas de cultivo y los pastos para la cría del ganado. En este sentido, el efecto de la deforestación y/o pérdida del hábitat será calculado mediante el porcentaje de áreas de distribución potencial predichas para la especie, en cada escenario climático considerado, coincidente con aquellas áreas naturales consideradas como intactas (Ortega-Andrade *et al.*, 2015; Lizcano *et al.*, 2015; Atauchi *et al.*, 2020). Subsecuentemente, se realizó una evaluación de la disponibilidad de ecosistemas siguiendo la metodología propuesta por Ortega-Andrade *et al.* (2015) y Lizcano *et al.* (2015), la cual consiste en calcular las áreas (en km²) de los ecosistemas que coincidan con las áreas de distribución estimados por el modelo de la especie y estimar un valor de importancia relativa para cada uno de ellos. El área total de los ecosistemas para el área de estudio fue obtenida de los mapas de los ecosistemas continentales de México (INEGI, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/default.html#Mapa>).

Finalmente, si bien a nivel internacional se reconoce el importante papel desempeñado por los actuales sistemas de Áreas Protegidas (APs) en la conservación de la biodiversidad (Figueroa & Sánchez-Cordero, 2008), recientes trabajos sugieren que, en el caso de la avifauna de los bosques secos neotropicales, en los que se distribuye *L. brachylophus*, muestran una

representación inadecuada (menos del 8%) de los rangos de distribución de las especies (Prieto-Torres *et al.*, 2018). Por ello, a fin de determinar la importancia de este tipo de áreas para reducir los riesgos de extinción de *L. brachylophus* en el futuro, se calculó la proporción (en Km²) de las áreas de distribución potencial de la especie que se encuentran dentro de los límites de las APs en el estado Guerrero. Para ello, se compararon los mapas de distribución de la especie con los polígonos de distribución de las APs, que fueron obtenidos del portal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI; disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>) y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (disponible en: <https://www.gob.mx/conanp>) de México.

Perfil climático de los registros históricos de *Lophornis brachylophus*.

Para evaluar la capacidad de adaptación *L. brachylophus* a nuevas condiciones climáticas, se determinaron los Perfiles de Ocupación de Nicho (PON; Evans *et al.*, 2009) considerando la división temporal de los registros históricos de avistamiento en intervalos de 10 años: <2000; 2001-2010; 2011-2019. Para determinar si existen o no diferencias significativas entre las condiciones climáticas considerando las 19 variables climáticas utilizadas por la especie a lo largo del tiempo se implementó un Análisis de Varianza (ANOVA) en el programa R. Los PON de cada intervalo (decenio) fueron construidos utilizando la función “extraer valores” de QGIS, para así obtener las condiciones climáticas que definen las localidades de registro para los avistamientos. Esta información será utilizada para comparar las diferencias climáticas observadas en aquellas áreas predichas en el futuro como “ganancia” o “pérdida” dentro de la distribución de *L. brachylophus* siguiendo la metodología propuesta por Cobos & Bosch (2018) y Atauchi *et al.* (2020).

RESULTADOS

Distribución actual del colibrí Coqueta de Atoyac.

El modelo final de idoneidad obtenido mostró altos valores para la prueba de parcial ROC (1.97), con valores AICc de 319.48 y un error de omisión para los datos de 0.0%. Estos valores de rendimiento indican que los modelos de distribución fueron estadísticamente mejores que el

azar, por lo que se consideró que reconstruyen adecuadamente las condiciones del nicho ecológico de la especie. Los parámetros de configuración de los modelos fueron: producto y umbral (pt) para el rasgo de salida (“*feature*”) y un valor de múltiplo de regularización de 1.6. El conjunto final de variables climáticas utilizadas y su porcentaje de distribución en el modelo se presentan en la Tabla 2. En términos generales, para los tres enfoques de modelado utilizados, se observó que las variables BIO 12, BIO 19, BIO 15 y BIO 1 fueron las que más contribución tuvieron para el modelo de la especie, representando en conjunto más del 88% de contribución.

Tabla 2. Selección de variables ambientales no correlacionadas con sus respectivas contribuciones para el modelo de distribución de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) en este estudio.

Variables ambientales utilizadas y porcentaje (%) de contribución en la construcción del modelo							
Enfoque de modelado	Bio 12:	Bio 19:	Bio 15:	Bio 1:	Bio 9:	Bio 3:	Dem:
No extrapolación ni do campling	38.9	23.4	14.4	12.0	8.9	1.7	0.5
Extrapolación y do campling	39.7	16.8	17.7	12.3	10.1	0.6	2.9
Extrapolación	31.6	34.3	12.3	12.6	3.7	2.5	2.9
Promedio	36.7	24.8	14.8	12.3	7.6	1.6	2.1

El área de idoneidad predicha por los modelos en el presente para el colibrí Coqueta de Atoyac fue, en promedio, de ~611 km², localizadas principalmente dentro de la Sierra de Atoyac en el occidente del estado de Guerrero (Figura 3, Tabla 3). De acuerdo con estos modelos, el rango de elevación promedio observado para la distribución de esta especie fue de 1,026.76 ± 230.33 msnm. Dos ecosistemas naturales fueron identificados como importantes para la distribución actual de la Coqueta de Atoyac: las selvas cálidas secas (160.6 km²; ~26.8%) y los bosques naturales de sierras templadas (451 km²; ~73.2%). Además, al evaluar el efecto de la deforestación en las áreas de idoneidad ambiental de la especie, se observó en promedio una reducción del 36.5% de la superficie predicha. Desafortunadamente, el sistema actual de APs de México no incluye ningún porcentaje de la superficie predicha para la distribución de la especie.

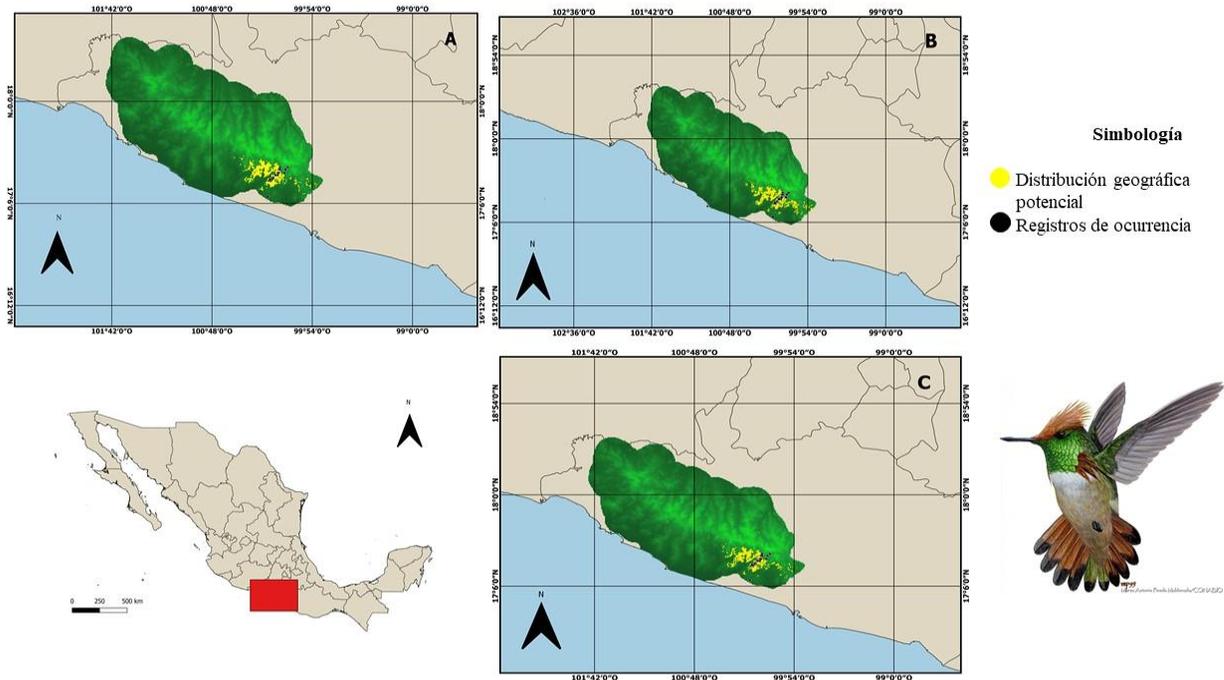


Figura 3. Mapas mostrando los patrones de distribución geográfica potencial de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) para los escenarios climáticos y uso de suelo del presente. Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo extrapolación, pero no campling; y (c) permitiendo tanto la extrapolación como el campling. Imagen tomada de <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/6339-Lophornis-brachylophus>

Distribución potencial del colibrí Coqueta de Atoyac en el futuro.

Los modelos mostraron patrones similares (34.36% de coincidencia) de distribución para la especie entre los tres enfoques de modelación utilizados. En términos generales, los resultados muestran un efecto negativo en los patrones de distribución de la especie por las modificaciones del clima en el futuro, con un impacto mayor (reducción promedio del 47.92%) al asumir una nula capacidad de dispersión. Considerando un escenario de dispersión para el colibrí Coqueta de Atoyac, se observó la colonización de ~68 km² (13.23%) de nuevas áreas geográficas en el futuro. No obstante, aun en este escenario de dispersión, se observó una tendencia global de reducción (en promedio del 38.12%) de las áreas de distribución en el futuro (Tabla 3, Figura 4).

De manera particular se observó que los valores más altos (3.2 veces mayor) de superficie predicha como idónea para la distribución de la especie (incluyendo menores de pérdida de áreas por efectos del cambio climático) se predicen al utilizar el enfoque “*extrapolation*”. De hecho,

Tabla 3. Patrones de distribución geográfica potencial presente y futuros del colibrí Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*). Los resultados aquí mostrados para el futuro están basados en los mapas finales obtenidos al promediar las predicciones de los dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) y cuatro modelos generales de circulación (CCSM4, MIROC5, ACCESS y HadGEM2-ES) para el año 2050. Para cada enfoque de modelado utilizado se muestra la proporción de cambio predicha por efecto del cambio climático global y/o deforestación, el porcentaje de áreas nuevas colonizadas estimadas, la proporción de áreas con vegetación intacta, la proporción de áreas protegidas estimadas y el promedio de elevación.

MODELOS	Distribución potencial (km²)	% de cambio por CCG	Áreas nuevas (%)	Vegetación intacta (%)	% de cambio por CCG+defoest.	AP (%)	Elevación (msnm)
<i>No extrapolación ni do campling</i>							
Presente	543	-	-	347 (63.9%)	-	- (0%)	1025.9 ± 228.7
2050 (dispersión)	272	-49.91	37 (13.6%)	180 (66.2%)	-66.9	- (0%)	941.7 ± 188.6
2050 (no dispersión)	235	-56.72	-	177 (75.3%)	-67.4	- (0%)	944.9 ± 183.2
<i>Extrapolación y do campling</i>							
Presente	529	-	-	343 (64.8%)	-	- (0%)	1022.6 ± 221.8
2050 (dispersión)	195	-63.14	10 (5.13%)	134 (68.7%)	-74.6	- (0%)	972.1 ± 181.6
2050 (no dispersión)	185	-65.03	-	105 (56.8%)	-80.2	- (0%)	964.4 ± 179.9
<i>Extrapolación</i>							
Presente	763	-	-	473 (61.9%)	-	- (0%)	1031.8 ± 240.4
2050 (dispersión)	753	-1.31	158 (20.9%)	507 (67.3%)	-33.6	- (0%)	1042.4 ± 225.0
2050 (no dispersión)	595	-22.02	-	389 (65.4%)	-49.0	- (0%)	1038.4 ± 227.9

CCG: Cambio Climático Global **Deforest:** Deforestación y pérdida de hábitat por uso de suelo. **AP:** Áreas protegidas

bajo este enfoque fue predicha la mayor cantidad de áreas nuevas a colonizar en el futuro por la especie (158 km² [20.98%]) y un desplazamiento altitudinal positivo (de 10.5 msnm) al ser comparado con los patrones en el presente (Tabla 3). Contrariamente, los enfoques “no extrapolation ni do campling” y “extrapolation y do campling” mostraron áreas de distribución geográfica potencial en el futuro de 272 km² y 195 km², respectivamente, con mayores disminuciones por los efectos del cambio climático. En estos dos últimos enfoques se estimó menos de un 15% de áreas nuevas a colonizar por la especie en el futuro, y un desplazamiento altitudinal negativo (-68msnm).

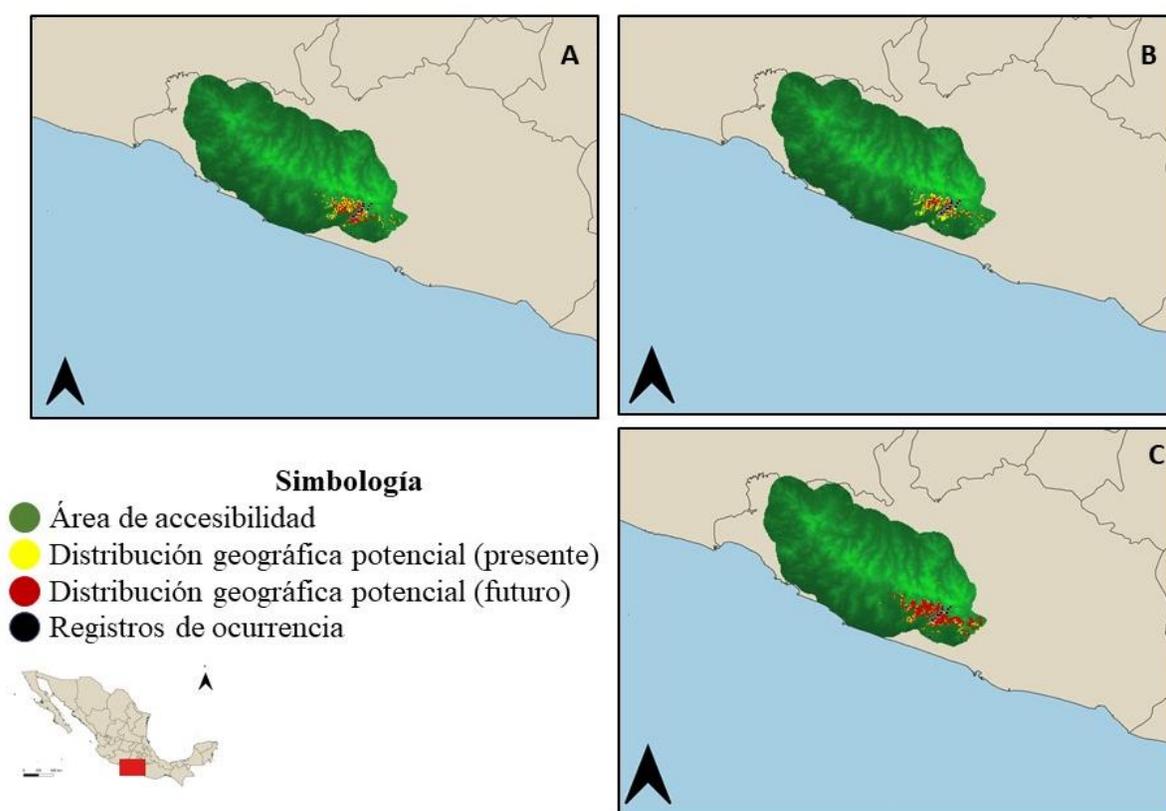


Figura 4. Mapas de distribución potencial geográfica de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) para los escenarios climáticos y uso de suelo del futuro (año 2050), considerando dos valores de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5) e hipótesis de dispersión de la especie. Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo tanto la extrapolación como el campling; y (c) permitiendo la extrapolación, pero no campling.

Independientemente del clima y del escenario de dispersión, se observó que en promedio el ~32.61% de la distribución potencial de la especie podría considerarse climáticamente estable.

De acuerdo con el análisis MOP, no se encontraron superficies predichas como idóneas que correspondan a climas no análogos (es decir nuevos) en el futuro bajo ningún enfoque (E, EC, NE). No obstante, se estima que para el año 2050 en el área de accesibilidad de la especie se podrán encontrar alrededor de 7.8% (RCP4.5) y 12.5% (RCP8.5) de sitios con climas no análogos (Figura 5). Finalmente, los resultados muestran que aquellos sitios donde la distribución de la Coqueta de Atoyac tiende a desaparecer, corresponden a las áreas que presentarán un incremento sustancial de los valores de temperatura (Tabla 4), principalmente para la temperatura media anual (>2.1 °C) y Temperatura media del cuarto más seco (>1.9 °C) del año, así como una reducción de la precipitación media anual (<31 mm) y del cuarto más frío (<40 mm).

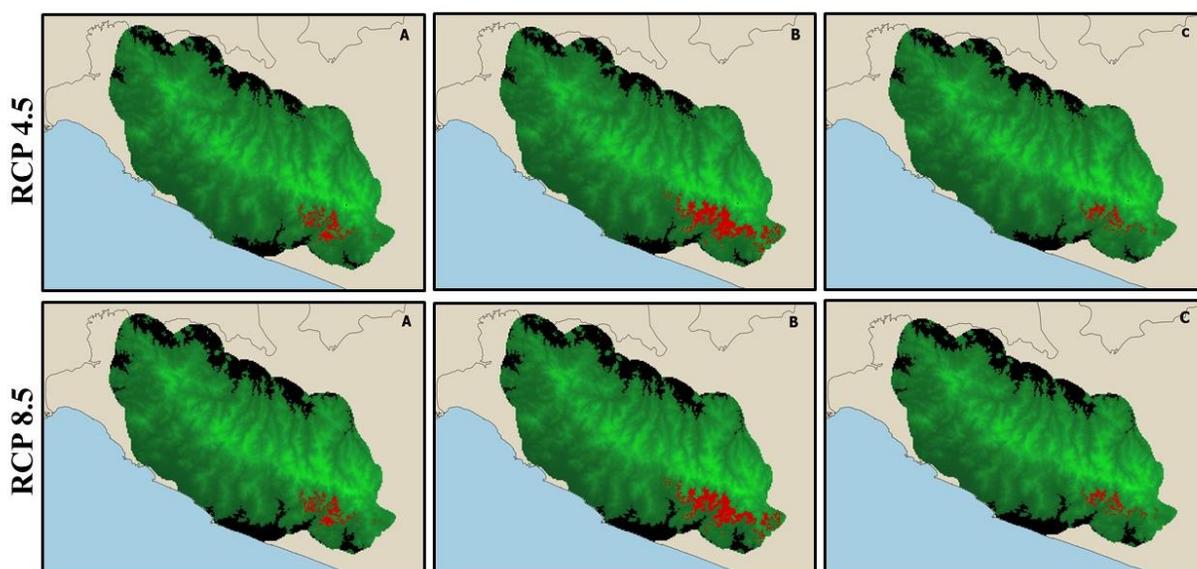


Figura 5. Resultados obtenidos para los análisis MOP y la identificación de condiciones ambientales no análogas para el año 2050 considerando dos vías de concentración representativas de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5). Las áreas negras dentro de los mapas representan aquellos sitios, donde una o más variables ambientales están fuera del rango presente en los datos de entrenamiento. Los valores de similitud con M para los cálculos de MOP se estimaron considerando el promedio de cuatro modelos climáticos globales. Los polígonos rojos representan las áreas de distribución potenciales predichas por los modelos para cada escenario (Figura 3). Letras en los mapas corresponden a cada uno de los enfoques de modelado utilizados en este estudio: (a) sin extrapolación ni campling; (b) permitiendo extrapolación, pero no campling; y (c) permitiendo tanto la extrapolación como el campling.

Por otra parte, en el futuro se identificaron reducciones en los tipos de ecosistemas naturales utilizados por la especie, siendo las proporciones observadas en las selvas cálidas secas (~ 87 km²; 23.4%) y los bosques naturales de sierras templadas (~ 320 km²; 85.63%). Además, al evaluar el efecto de la pérdida de hábitat en la distribución potencial de la especie para el futuro,

se puede notar que en promedio aproximadamente un 33.4% de las áreas climáticas remanentes coinciden con las zonas perturbadas por el hombre tanto en los escenarios de dispersión y no dispersión para la especie (Tabla 3). En este sentido, el efecto combinado del cambio climático y la deforestación muestra reducciones mayores en la distribución potencial de la especie. Este efecto será mucho mayor en los escenarios de no dispersión para la especie, observando mayores reducciones (en promedio >65%) de las áreas de distribución potencial en el futuro respecto al rango conocido actualmente para *L. brachylophus*. Desafortunadamente, al igual que en los escenarios del presente, los modelos de distribución potencial obtenidos para el año 2050 no mostraron extensiones de áreas idóneas dentro del sistema nacional de APs.

Tabla 4. Valores promedios (mínimo-máximo) de las variables bioclimáticas para la distribución actual de la Coqueta de Atoyac (*Lophornis brachylophus*) y las diferencias respecto a las áreas predichas como pérdida en el futuro (año 2050) considerando los tres enfoques de modelado aquí utilizados.

Variables climáticas						
Enfoque de modelado	Bio 1	Bio 3	Bio 9	Bio 12	Bio 15	Bio 19
<i>No extrapolación ni do campling</i>						
Presente	23.96 ± 0.66	7.27 ± 0.09	24.25 ± 0.62	1,676.07 ± 70.40	103.46 ± 1.17	67.64 ± 16.97
Áreas perdidas (2050)	2.17 ± 0.45	-0.62 ± 0.37	1.92 ± 1.10	-30.80 ± 6.40	0.66 ± 0.60	-39.48 ± 9.59
<i>Extrapolación y do campling</i>						
Presente	23.98 ± 0.62	7.27 ± 0.08	24.27 ± 0.58	1,680.94 ± 68.94	103.46 ± 1.14	67.54 ± 17.24
Áreas perdidas (2050)	2.15 ± 0.42	-0.62 ± 0.35	1.92 ± 0.09	-30.91 ± 5.86	0.72 ± 0.54	-40.20 ± 8.21
<i>Extrapolación</i>						
Presente	23.90 ± 0.76	7.27 ± 0.09	24.19 ± 0.72	1,670.38 ± 82.88	104.03 ± 1.56	67.12 ± 15.02
Áreas perdidas (2050)	2.08 ± 0.45	-0.63 ± 0.37	1.91 ± 0.13	-31.24 ± 8.57	0.73 ± 0.67	-50.63 ± 6.26

Perfil climático histórico de *Lophornis brachylophus*.

Los Perfiles de Ocupación de Nicho (PON) obtenidos para las tres décadas (<2000, 2001-2010 y 2011-2019) en las que se obtuvieron los registros históricos de avistamiento de la especie mostraron diferencias significativas entre las condiciones climáticas para la mayoría de las variables bioclimáticas, con excepción de BIO 6 y BIO 17 (Figura 6). Las variables BIO 2 (1.26 ± 0.45 [<2000], 1.31 ± 0.54 [2001-2010] y 1.31 ± 0.40 [2011-2019]) y BIO 19 (57.7 ± 4.4

[<2000], 54.4 ± 5.0 [2001-2010] y 53.2 ± 4.02 [2011-2019]) fueron las que mostraron mayor diferenciación entre las condiciones climáticas utilizadas por la especie a través del tiempo. De hecho, este resultado indica que la especie hoy en día puede ser localizada en zonas con una mayor variación del rango diurno de la temperatura y menor precipitación para el trimestre más frío, en comparación a las décadas anteriores.

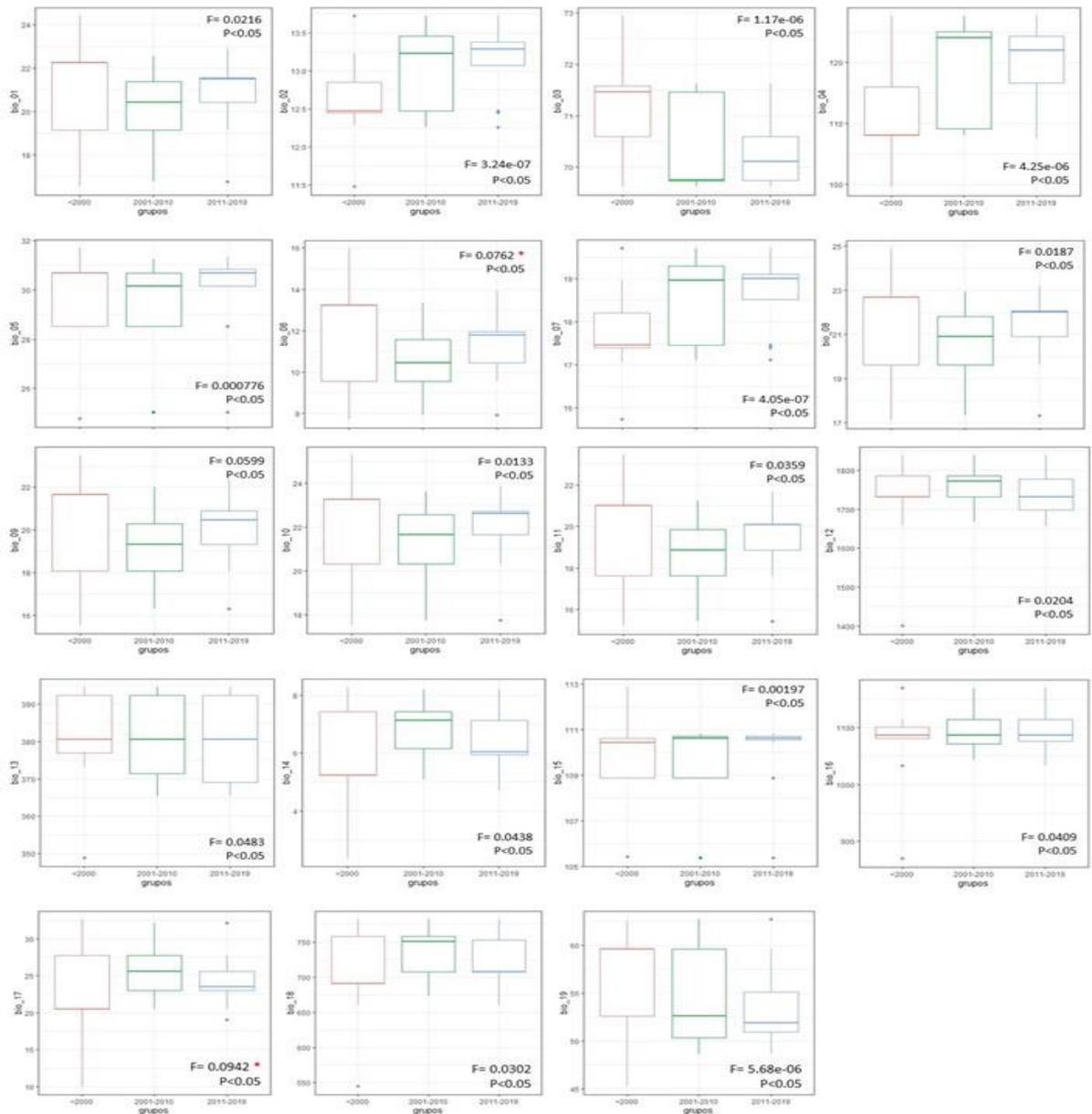


Figura 6. Resultados obtenidos para los análisis PON, basados en tres periodos <2000 en color rojo, 2001 – 2010 color verde y 2011-2019 en color azul. Los análisis fueron obtenidos mediante un análisis ANOVA de una vía. Los asteriscos de color rojo en los diagramas de caja representan las variables que estadísticamente no mostraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las condiciones climáticas utilizadas por la especie a través del tiempo.

DISCUSIÓN

Distribución y estado actual de *Lophornis brachylophus*.

La reducida extensión de área potencial de distribución estimada para *L. brachylophus* es concordante con los trabajos previos reportados por Sierra-Morales *et al.* (2016) y la IUCN (2018), donde se le considera una especie con una extensión de ocurrencia pequeña. De hecho, a esta especie se le considera como restringida, principalmente, a una franja asociada a la carretera de Atoyac-Paraíso-Puerto de Gallo en la Sierra de Atoyac. No obstante, los patrones espaciales no coincidentes entre estos mapas podrían sugerir que la distribución potencial de esta especie pudiese ser un poco mayor a la conocida en la actualidad, por lo cual se requieren más estudios enfocados en el monitoreo de las poblaciones a lo largo de la región. Una posible explicación para estas mayores extensiones observadas al respecto de las áreas de idoneidad para la especie está dada por la presencia de ecotonos entre el bosque tropical deciduo y el bosque mesófilo de montaña a lo largo de la Sierra de Atoyac, lo cual favorece a la identificación dentro de los modelos de una mayor proporción de áreas con condiciones ambientales similares a las requeridas por la especie (Arizmendi *et al.*, 2021). No obstante, es importante considerar que los modelos obtenidos en este estudio se refieren a áreas climáticamente idóneas, las cuales no necesariamente están siendo ocupadas por la especie, ya que además se requieren de condiciones bióticas particulares (ej. presencia de plantas para la alimentación) y/o cierto grado de cobertura vegetal (Arizmendi & Berlanga, 2014; Prieto-Torres *et al.*, 2021).

Lo anterior es importante si consideramos que anualmente a nivel nacional el 1% de territorio mexicano se ve modificado a causa de la deforestación (FAO, 2001). De manera particular, los dos tipos de ecosistemas reportados como de mayor importancia en la distribución de *L. brachylophus* corresponden a bosques considerados como frágiles y en peligro de extinción por el desarrollo de actividades antropogénicas como la tala clandestina, los incendios, la agricultura, la ganadería y el desarrollo urbano (Navarro-Sigüenza *et al.*, 2014; CONABIO, 2021; Arizmendi *et al.*, 2021). De hecho, el bosque mesófilo de montaña es el entorno mayormente utilizado para la siembra de café de altura (CONABIO, 2021), la cual es la principal actividad económica de la Sierra de Atoyac (González-González & Hernández-Santana, 2016). En este sentido, nuestras estimaciones coinciden con la idea de considerar a la deforestación y

fragmentación del hábitat como importantes amenazas para las poblaciones de esta especie endémica (Anderson *et al.*, 2010; Arizmendi *et al.*, 2021), así como para las otras especies de colibríes residentes del estado de Guerrero, donde Sierra-Morales *et al.* (2016) reportan un alto grado de coincidencia con ambientes alterados o agroecosistemas.

Impactos del cambio climático global.

Los resultados muestran una reducción del área de distribución ocupada por la especie, así como un ligero aumento del rango de elevación con respecto al presente, como consecuencia de las modificaciones climáticas en el futuro para la región de estudio. Estos hallazgos coinciden con la idea de que el siglo XXI habrá cambios negativos significativos en los patrones de distribución de la biota montañosa como consecuencia del cambio climático (Rojas-Soto *et al.*, 2012; Monterrubio-Rico *et al.*, 2015; Ortega-Andrade *et al.*, 2015; Atouchi *et al.*, 2020). Las tendencias observadas en este estudio para la Coqueta de Atoyac son coincidentes a las reportadas para otros grupos taxonómicos, como los psitácidos *Rhynchopsitta pachyrhyncha* y *R. terrisi* (Monterrubio-Rico *et al.*, 2015) y otras especies de colibríes, tanto de amplia distribución (ej. *Amazilia beryllina*) como semi-endémicas (ej. *A. violiceps*) y endémicas (ej. *Cyananthus sordidus*) (Lara *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2021). Para todos estos casos se estiman igualmente reducciones significativas de las áreas de idoneidad para las especies en el futuro, incluyendo un desplazamiento altitudinal. Además, es importante resaltar que estos impactos negativos pudieran ser de mayor significancia en aquellas especies que, como *L. brachylophus* presenten distribución coincidente a los bosques tropicales caducifolios (Lara *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2021).

Aunque los resultados sugieren la colonización de nuevos sitios y un posible desplazamiento altitudinal en el futuro para esta especie, es importante considerar que existen diversas limitantes ambientales y fisiológicas que podrían impedir el alcance de estos movimientos. Por ejemplo, es de conocimiento que la Coqueta de Atoyac se distribuye en un rango de elevación entre los 900 y 1,800 msnm (IUCN, 2018), lo cual implica determinadas características morfológicas que influyen en el uso de los recursos, en su capacidad de vuelo y habilidades competitivas (Buermann *et al.*, 2011; Rodríguez-Flores *et al.*, 2019). Por ello, un desplazamiento altitudinal podría requerir a su vez de adaptaciones morfo-fisiológicas (ej. la

amplitud del golpe del ala, cambios en el vuelo, etc.) que compensen las condiciones en estos nuevos entornos (Buermann *et al.*, 2011). Si las especies no pueden adaptarse rápidamente a estos nuevos entornos, el tamaño de las poblaciones podría disminuir y, consecuentemente afectar su supervivencia en el futuro (de Matos Sousa *et al.*, 2021). Prieto-Torres *et al.* (2021) consideran de hecho que *L. brachylophus* será una especie “perdedora” ante el cambio climático debido a que su restringida extensión de distribución la hacen una especie con nicho ecológico estrecho, por lo cual es poco probable que puedan colonizar sitios con condiciones ambientales nuevas (Thuiller *et al.*, 2005; Sonne *et al.*, 2016; Broennimam, 2006). En este sentido, los resultados obtenidos sobre una posible colonización de nuevas áreas deben tomarse con mucha cautela. Se necesitan más estudios que analicen la capacidad de esta especie para moverse y adaptarse rápidamente a nuevas áreas y condiciones ambientales. La implementación de programas de monitoreo a mediano y largo plazo es un paso fundamental para alcanzar esta meta.

De acuerdo con Ortega *et al.* (2019), “...el potencial adaptativo de una especie está determinado por su capacidad de responder a los rápidos cambios ambientales en un periodo relativamente corto ...”. Esto es importante si consideramos que los resultados muestran la utilización de nuevas condiciones ecológicas (con 0.07°C de diferencia) en los últimos treinta años para los individuos de *L. brachylophus*. No obstante, para el futuro cercano se pronostica un aumento en la temperatura media anual mayor a los 2°C y una reducción de la precipitación media anual (<31 mm). Este patrón indica que el ritmo del calentamiento global estaría rebasando la capacidad que tiene la especie para cambiar y/o adaptarse a las nuevas condiciones ambientales. Esto es confirmado con los resultados del análisis MOP, observando que, independientemente de la capacidad de dispersión de la especie, en el futuro no existen áreas de estricta extrapolación en las predicciones dentro de los modelos. Con base a todos estos patrones observados, sin dudas *L. brachylophus* debe considerarse una especie altamente vulnerable al cambio climático.

Además, la capacidad de migración y/o desplazamiento de los organismos depende de otros factores (no evaluados en este estudio) de su historial natural —como el tamaño y la tasa de reproducción— que influyen directamente en como una especie se enfrenta a los cambios en su entorno (Isaac *et al.*, 2009). En este sentido, aunque los resultados sugieren una baja proporción (<15%) de áreas nuevas a colonizar en el futuro, el actual estado poblacional de la

especie (con densidades entre 3.6 y 18 individuos por km², IUCN, 2018) se muestra como un escenario poco favorable para que estas áreas logren ser ocupadas en el futuro. Desde esta perspectiva, de continuar la pérdida y fragmentación del hábitat se podría estar alcanzando importantes interrupciones de las migraciones lo que podría conducir a una posible extinción de la especie (ej. Prieto-Torres *et al.*, 2016; Arizmendi *et al.*, 2021). Por todo lo anterior el riesgo de extinción de la Coqueta de Atoyac podría ser aún mayor al que ya conocemos en la actualidad. Esto confirma la ampliamente aceptada idea de que, en el futuro, los impactos combinados del cambio climático y la pérdida de hábitat representan la principal amenaza para la supervivencia a largo plazo de los colibríes en México (Lara *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2021) y la biota en general (Root *et al.*, 2003).

Por otro lado, es bien conocido que uno de los principales factores que influyen en la migración altitudinal de los colibríes es la variación estacional de sus recursos alimenticios, así como el costo y que tanto deban competir por los recursos (Arizmendi *et al.*, 2021). La Coqueta de Atoyac no está exenta de estos factores. De hecho, se sabe que se alimenta de las flores de los cafetos y de *Clusia salvinii* (Arizmendi *et al.*, 2021). Por lo que las relaciones interespecíficas plantas-colibríes podrían ser una importante limitante para esta especie en el futuro. Se sabe que en plantas el aumento de temperatura puede propiciar la apertura temprana de la hoja, floración y germinación (Correa-Lima *et al.*, 2019) tales variaciones pueden propiciar la interrupción de las interacciones planta-polinizador, la cual puede ser perjudicial para las poblaciones de esta especie (Gordo y Sanz, 2010, Aldridge *et al.*, 2011); especialmente si consideramos que tanto plantas como colibríes pueden responder de forma diferente ante estos escenarios de cambio climático. Por ello, se deben incluir los modelos de especies de plantas como *C. salvinii* y *Coffea arabica*, e incluso otras especies de colibríes (ej. *Eupherusa poliocerca*) con las que tiene interacciones agonísticas por la competencia de recursos (ver Atauchí *et al.*, 2018). Esto no fue evaluado en este estudio, pero sin dudas podría ayudar a obtener mejores estimaciones y entender las dinámicas de las respuestas de *L. brachylophus* en el futuro. Esto es importante considerando que Ponce-Reyes *et al.* (2012) y Rojas -Soto *et al.* (2012) sugieren que el bosque mesófilo de montaña podría verse afectado tanto en su distribución geográfica como en la composición de sus especies (tanto plantas como aves) en el futuro cercano.

Perspectivas de Conservación.

Aunque las áreas naturales protegidas han sido y son reconocidas como un importante instrumento para la conservación de la biodiversidad a nivel nacional e internacional, los resultados obtenidos muestran que dichas áreas en México son y serán insuficientes para la protección a largo plazo de esta especie endémica (ej. Arizmendi *et al.*, 2016). Este es un escenario concordante en varios estudios que analizan el papel de las áreas protegidas ante escenarios de cambio climático global en México (Ponce-Reyes *et al.*, 2012; Prieto-Torres *et al.*, 2016, 2021; Mayani-Parás *et al.*, 2020). Además, este es una condición compartida para la gran parte de la avifauna (donde se incluyen otras especies de colibríes en peligro de extinción) del estado de Guerrero. En este estado, a pesar de que los hábitats originales constantemente sufren modificaciones como consecuencia del cambio de uso de suelo, se observa la menor cantidad de ANPs en la República Mexicana (Arizmendi *et al.*, 2016; Sierra-Morales *et al.*, 2016). Esto junto a las estimaciones obtenidas en escenarios de cambio climático sugieren que la especie *L. brachylophus* no tendrá un futuro muy prometedor.

Ante estos escenarios, es importante que se promuevan la creación de nuevos sitios de conservación, que sirvan incluso como corredores ecológicos, para las poblaciones remanentes y resilientes en el tiempo. Además, es sustancial que la creación de estos sitios contemple los efectos combinados del cambio climático y la deforestación, pues actualmente la red de áreas protegidas es menos efectiva principalmente porque no cubren la distribución modificada de las especies en el futuro (ej. Prieto-Torres, *et al.*, 2021). Por otra parte, es indispensable promover la participación de las comunidades dentro de iniciativas de manejo sustentable, restauración y conservación del paisaje. El uso de estrategias como el “pago por servicios ecosistémicos” para preservar los remanentes forestales puede ser un enfoque muy útil para ello (Naime *et al.*, 2020; Sánchez-Romero *et al.*, 2021). Estas acciones son indispensables para el resguardo de esta ave y los hábitats que ocupa, especialmente considerando las altas tasas de deforestación por actividades agrícolas que se observan en el estado de Guerrero.

Los resultados obtenidos en este estudio representan una valiosa guía sobre cuales áreas requieren inmediatas acciones de protección para la conservación a largo plazo de *L. brachylophus*, lo cual es una información básica para que autoridades y sociedad civil puedan

trabajar en el diseño y decreto de futuros planes de acción enfocados a reducir los riesgos de extinción de las poblaciones remanentes para esta especie endémica y vulnerable. No obstante, es importante incrementar los financiamientos y desarrollo de más investigaciones de este tipo, así como el monitoreo en campo de las poblaciones existentes, para de esta manera lograr contribuir al conocimiento sobre nuestra biodiversidad y al establecimiento de una planificación eficiente para su conservación a largo plazo.

CONCLUSIONES

- El cambio climático global afectará el patrón actual de distribución de la especie *L. brachylophus* con una marcada tendencia a la reducción de áreas climáticamente idóneas disponibles en el 2050, independientemente de que la especie pueda o no desplazarse a nuevas áreas en el futuro. Estas reducciones de las áreas podrían afectar directamente la supervivencia de la especie e incrementará los riesgos de extinción en el futuro.
- Si bien el cambio climático global y la deforestación son factores que individualmente representan una amenaza para la biodiversidad, la acción simultánea de estas amenazas representa el mayor riesgo para la sobrevivencia de *L. brachylophus*, ya que podrían ocasionar reducciones mayores, en promedio, al 50% de las áreas de distribución potencial en el futuro.
- El sistema actual de áreas naturales protegidas del país no es, ni será, suficiente y/o efectivo para la protección a largo plazo de esta especie ante los escenarios de cambio global en clima y uso de suelo.
- Considerando el potencial cambio en el patrón de distribución de esta especie en el futuro, es importante considerar el desarrollo de trabajos enfocados en estudiar las interacciones de este colibrí con otras especies (ej. plantas de las que se alimenta u otras especies de colibríes con las que compite por recursos), para de este modo obtener mejores estimaciones sobre la dinámica de respuesta de este colibrí al cambio climático global.

REFERENCIAS

- Aldridge G, Inouye, D.W, Forrest, J.R, Barr, W.A & Miller-Rushing, A.J. (2011). Emergence of a mid-season period of low floral resources in a montane meadow ecosystem associated with climate change. *Journal of Ecology* 99: 905-913.
- Alkishe, A., Petreson, T. & Samy, M.A. (2017). Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes Ricinus Abdelghaffar*. *PloS ONE* 12: e0189092.
- Anderson, L.D., House, P., Hyman, E.R., Steiner, R., Hawkins, R.H., Thorn, S., Rey, J.M., Espinal, R.M & Marineros, E.L. (2010). Rediscovery of the Honduran Emerald *Amazilia luciae* in western Honduras: insights on the distribution, ecology and conservation of a 'Critically Endangered' hummingbird. *Bird Conservation International* 20: 255-262.
- Anderson, R., Lew, D. & Peterson, A. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* 162: 211-232.
- Araújo, M.B; Anderson, R.P; Barbosa, M. A; Beale, C.M; Dormann, C.F; Early, R; Garcia, R.A; Guisan, A; Maiorano, L; Naimi, B; O'Hara, R.B; Zimmermann, N.E & Rahbek, C. (2019). Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science advances* 5: 4858.
- Arizmendi, M.C & Berlanga, H. (2014). *Colibríes de México y Norteamérica*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, Talpan, México.
- Arizmendi, M.C., Berlanga, H., Rodríguez, F.C., Vargas, C.V., Montes, L.L & Lira, R. (2016). Hummingbird Conservation in Mexico: The Natural Protected Areas System. *Natural Areas Journal* 36: 366-376.
- Arizmendi, M.C., Núñez-Rosas, L., Berlanga, H., Quiroga, R.M., Soberanes, G.J.M., Macias, C.C., Vidal, R. R.M & López-Segoviano, G. (2021). Endemic and endangered Short-crested Coquette (*Lophornis brachylophus*): floral resources and interactions. *Avian Conservation and Ecology* 16: 13.
- Atauchi, J.P., Constantino Auca, C.C., Ferro, G. & Prieto-Torres, D.A. (2020). Present and future potential distribution of the endangered *Anairetes alpinus* (Passeriformes: Tyrannidae) under global climate change scenarios. *Journal of Ornithology* 161: 723-738.
- Atauchi, J.P., Townsend, A.P. & Flanagan, J. (2018). Species distribution models for Peruvian plantcutter improve with consideration of biotic interactions. *Journal of Avian Biology* 49: e01617.

- Barve, N. & Barve, V. (2016). *ENMGadgets*: tools for pre and post processing in ENM workflow. R package ver. 0.0.14 Disponible en: <https://github.com/narayanibarve/ENMGadgets>.
- Barve, N., Barve, V., Jiménez, V.A, Lira-Noriega, A., Maher, S.P., Peterson, A.T., Soberón, J. & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling* 222: 1810-1819.
- Bi, D., Dix, M., Marsland, S.J., O'Farrell, S., Rashid, H., Uotila, P. & Yan, H. (2013). The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Aust. Meteorological Oceanography Journal* 63: 41-64.
- BirdLife International (2018). *Lophornis brachylophus*. *La Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN*: e.T22687196A130649157. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22687196A130649157>
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, F.G., Alkemade, R.M.J., & Guisan (2006). Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*. 12: 1079-1093.
- Buermann, W., Chaves, J.A., Dudely, R., McGuire, J.A., Smith, T.B & Douglas, L.A. (2011). Projected changes in elevational distribution and flight performance of montane Neotropical hummingbirds in response to climate change. *Global Change Biology*. 17: 1671-1680.
- Buytaert, W., Cuesta, C.F. & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology Biogeography* 20: 19-33.
- Cavelier, J., Lizcano D.J., Yerena, E. & Downer, C. (2011). The mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) and Andean bear (*Tremarctos ornatus*): two charismatic large mammals in South American tropical mountain cloud forest. Pp. 172- 181. *En*: Bruijnzeel, L.A., F.N. Scatena & L.S. Hamilton (Eds.), *Tropical Montane Cloud Forests*. Cambridge University Press, New York, United States.
- Chamberlain, S., Barve, V., Mcglinn, D., Oldoni, D., Desmet, P., Geffert, L. & Ram, K. (2019). *Rgbif*: Interface to the Global Biodiversity Information Facility API. R package version 1.2.0. Disponible en : <https://CRAN.R-project.org/package=rgbif>
- Cobos, M.E & Bosch, R.A (2018) Recent and future threats to the Endangered Cuban toad *Peltophryne longinasus*: potential additive impacts of climate change and habitat loss. *Oryx* 52: 116-125.

- Cobos, M.E., Peterson, A.T., Osorio, O.L. & Jiménez-García, D. (2019). An exhaustive analysis of heuristic methods for variable selection in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Informatics* 53: 100983.
- Collevatti, R., Lima, R.M., Diniz, F. J., Oliveira, G., Dobrovolski, R. & Terribile, L. (2013). Stability of Brazilian seasonally dry forests under climate change: Inferences for long-term conservation. *American Journal of Plant Sciences* 04: 792-805.
- CONABIO. (2021). Bosques nublados. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueNublado>.
- Correa-Lima, A. A.P., Varassini, G.I., Barve, N & Zwiener, P. V. (2019). Spatio-temporal effects of climate change on the geographical distribution and flowering phenology of hummingbird-pollinated plants. *Annals of botany*. 124: 389-398.
- Cuervo-Robayo, A.P., Telléz, O., Gómez, M.A., Venegas, B.C.S., Manjarrez, J. & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* 34: 2427-2437.
- de Matos sousa, O.N., Lopes, E.L., Costa, M, L., Motta-Junior, J.C., de freitas, S, G.H., Dornas, T., de Vasconcelos, F, M., Noriega, W., de Magalhães Tolentino, C.V., De-Carvalho, B. C., Barbosa, O.M., Ubaid, K.F., Nunes, P.A., Malaco, B.G. & Marini, A.M. (2021). Adopting habitat-use to infer movement potential and sensitivity to human disturbance of birds in a Neotropical Savannah. *Biological Conservation* 254: 108921.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: A Review of Methods to Deal with It and a Simulation Study Evaluating Their Performance. *Ecography* 36: 027-046.
- Downer, C.C. (1996). The mountain tapir, endangered 'flagship' species of the high Andes. *Oryx*. 30: 45-58.
- Elith, J. & Leathwick, J.R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677-697.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. & Yates, C.J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43-57.

- Elith, J., Graham, H.C., Anderson, D., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, J.R., Huettmann, F., Leathwick, R.J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, G.L., Loiselle, A.B., Manion, G., Moritz, G., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, M.J., Peterson, T.A., Phillips, J.S., Richardson, K., Scachetti, P., Schapire, E.R., Soberón, J., Williams, S., Wisz, S.M. & Zimmermann, E.N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.
- Evans, M.E.K.; Smith, S.A.; Flynn, R.S. & Donoghue, M.J. (2009). Diversity, Endemism, Species Turnover and Relationships among Avifauna of Neotropical Seasonally Dry Forests. *Naturalist* 173: 225-240.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2001). Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/fro/fra/index>.
- Feeley, K.J., Rehm, E.M. & Machovina, B. (2012). The responses of tropical forest species to global climate change: acclimate, adapt, migrate, or go extinct? *Frontiers in Biogeography* 4: 12621.
- Figuroa, F. & Sánchez-Cordero, V. (2008). Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation* 17: 3223-3240.
- Freyman, B. & Schuchmann, L.K. (2005). Collecting history of the hummingbird genera *Chaetocercus* Gray, 1855 and *Lophornis* Lesson, 1829. *Journal of Ornithology* 146: 61-64.
- GitHub. (2021). Kuenm: An R package for detailed development of Maxent Ecological Niche Models. Disponible en: <https://github.com/marlonecobos/kuenm>.
- Gordo, O. & Sanz, J.J. (2010). Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology* 16: 1082-1106.
- González-González, H.A. & Hernández-Santana, J.R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 90: 105-118.
- Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, B.J., Ilona Naujokaitis, L.I., Sutcliffe, R.P., Tulloch, T.I.A., Tracey, J.R., Brotons, L., Eve McDonald, M.E., Chrystal Mantyka, P.C., Martin, T.G., Rhodes, R.J., Ramona, M., Setterfield, A.S., Elith, J., Schwartz, W.M., Brendan, A.W., Broennimann, O., Austin, M., Ferrier, S., Kearney, R.M., Possingham, P.H. & Buckley, M.Y. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters* 16: 1424-1435

- Hansen, J., Sato, M., Russell, G. & Kharecha P. (2013). Climate sensitivity, sea level, and atmospheric carbon dioxide. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371: 20120294.
- Hanspach, J., Kühn, I., Schweiger, O., Pompe, S. & Klotz, S. (2011). Geographical patterns in prediction errors of species distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 20: 779-788.
- Hijmans, R. J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. & Jarvis, A. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Holt, D.R. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 5: 311-315.
- INEGI. (2010). Cuéntame Inegi. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/#>.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático* [Equipo principal de redacción, R.K.Pachauri y L.A.Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Isaac, J.L., Vanderwal, J., Johnson, C.N & Williams, S.E (2009) Resistance and resilience: quantifying relative extinction risk in a diverse assemblage of Australian tropical rainforest vertebrates. *Diversity and Distributions* 15: 280-288.
- Lara, C., Feria-Arroyo, T.P., Dale, J., Muñoz, J., Arizmendi, M.C., Ornelas, J.F., Ortíz-Pulido, R., Rodríguez-Flores, C.I., Díaz-Valenzuela, R., Martínez-García, V., Díaz-Palacios, A., Partida, R., Enríquez, P.L., Rangel-Salazar, J.L & Schondube, J. (2012). Potential effects of the climate change in the distribution of hummingbirds: a study case with hummingbirds from the genus *Amazilia* and *Cyananthus*. *The Neotropical Ornithological Society* 23: 35-48.
- Liu, C., White, M. & Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography* 40: 778- 89.
- Lizcano, J.D., Prieto-Torres, D.A. & Ortega-Andrade, H.M. (2015). Capítulo 6: Distribución de la danta de montaña (*Tapirus pinchaque*) en Colombia: importancia de las áreas no protegidas para la conservación en escenarios de cambio climático. En: Payan, E. & C.A. Lasso (Editores). *I. Conservacion de grandes vertebrados en areas no protegidas de Colombia, Venezuela y Brasil. Serie Editorial Fauna Silvestre Neotropical*. Pp. 115-132.

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Bogotá, D.C., Colombia.
- López-Segoviano, E.G. (2007). *Efecto de la presencia de bebederos artificiales sobre los colibríes en el parque ecológico de la ciudad de México, Ajusco medio*. Tesis de maestría. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. Estado de México. México.
- Lovejoy, T.E. & Hannah, L. (2019) *Biodiversity and Climate Change: Transforming the Biosphere*. USA: Yale University Press.
- Maldonado, C., Molina, I.C., Zizka, A., Persson, C., Taylor, M.C., Albán, J., Chilquillo, E., Ronsted, N & Antonelli, A. (2015). Estimating species diversity and distribution in the era of Big Data: to what extent can we trust public databases? *Global Ecology and Biogeography* 24: 973-984.
- Mayani-Parás, F., Botello, F., Castañeda, S., Munguía-Carrara, M. & Sánchez-Cordero, V. (2021). Cumulative habitat loss increases conservation threats on endemic species of terrestrial vertebrates in Mexico. *Biological Conservation* 253: 108864.
- Menéndez, R., González, M.A., Hill, K.J., Brigitte Braschler, S.G.W., Collingham, Y., Fox, R., Roy, D.B & Thomas, C.D. (2006). Species richness changes lag behind climate change. *The royal society publishing* 273: 1465-1470.
- Merow, C.M.J., Thomas, C.E., Guisan, A., McMahon, M.S., Normand, S., Thuiller, W., Wüest., Zimmermann, N.E & Elith J. (2014). What do we gain from simplicity versus complexity in species distribution models? *Ecography* 37: 1267-1281.
- Monterrubio-Rico, T.C., Charre-Medellín, Juan. F & Sáenz-Romero, C. (2015). Current and future habitat availability for Thick-billed and Maroon-Fronted parrots in northern Mexican forest. *Journal of Field Ornithology* 83:1-16.
- Morrone, J.J. (2014). Biogeographical regionalisation of the Neotropical region. *Zootaxa* 3782: 1-110.
- Mota, V. C., Encarnación, L.A., Ortega-Andrade, H.M., Prieto-Torres, D.A., Peña-Peniche, A. & Rojas-Soto, O.R. (2019). Una breve introducción a los modelos de nicho ecológico. En: Moreno, C.E. (Editora) *La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Pp. 39-63. Universidad Autónoma de Estado de Hidalgo/ Libermex, Ciudad de México.

- Mota-Vargas, C. & Rojas-Soto, O.R. (2012). The importance of defining the geographic distribution of species for conservation: The case of the Bearded wood-partridge. *Journal for Nature Conservation* 20: 10-17.
- Naime, J., Mora, F., Sánchez-Martínez, M., Arreola, F. & Balvanera, P. (2020). Economic valuation of ecosystem services from secondary tropical forests: trade-offs and implications for policy making. *Forest Ecology and Management* 473: 118294
- Navarro-Sigüenza, A.G., Silva, H., Gual-Díaz, M., Sánchez-González, L.A. & Pérez-Villafaña, M. (2014). La importancia de las aves del Bosque Mesófilo de Montaña de México. Pp. 279-304. En: Gual-Díaz, M. & Rendón-Correa, A. (Eds.), *Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México Distrito Federal, México.
- Navarro-Sigüenza, A.G. & Peterson, A.T. (2007). *Lophornis brachylophus* (Coqueta creta corta) residencia permanente. En: *Distribución potencial. Catálogo de metadatos geográficos*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/loph_bragw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Navarro-Sigüenza, A.G (1986). *Distribución altitudinal de las aves en la sierra de Atoyac, Guerrero*. México: UNAM. Facultad de ciencias. Tesis de licenciatura en Biología.
- Olson, M.D., Dinerstein, E., Wikramanayake, D.E., Burgess, D.N., Powell, V.N.G., Underwood, C.E., D'Amico, A.J., Itoua, I., Strand, E.H., Morrison, C.J., Loucks, J.C., Allnutt, F.T., Ricketts, H.T., Kura, Y., Lamoreux, F.J., Wettengel, W.W., Hedao, P. & Kassem, R.K. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on earth. *Articles* 15: 993-938.
- Ortega-Andrade, H.M., Prieto-Torres, D.A., Gómez, I. & Lizcano, D. (2015). Ecological and geographical analysis of the distribution of the mountain tapir (*Tapirus pinchaque*) in Ecuador: Importance of protected areas in future scenarios of global warming. *PloS ONE*. 10: 1-20.
- Ortega, G.C.J., Machado, N., Diniz-Filho, F., Rangel, F.T., Araújo, B.M., Loyola, R & Bini, L.M. (2019). Meta-analyzing the likely cross-species responses to climate change. *Ecology and Evolution* 9: 11136-11144.

- Owens, H.L., Campbell, L.P., Dornak, L.L., Saupe, E.E., Barve, N., Soberón, J., Ingenloff, K., Lira-Noriega, A., Hensz, C.M., Myers, C.E. & Peterson, A.T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling* 263: 10-18.
- Parry M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P.J. & Hanson C.E. (2007). *Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Pearson, R.G., Martínez-Meyer, E., Velázquez, M.A., Caron, M., Corona-Núñez, R.O., Davis, K., Paz, D.A., García-Morales, R., Hackett, D.T., Ingram, J.D., Loyola, D.R., Lescano, J., Lira-Noriega, A., López-Maldonado, Y., Manuschevich, D., Mendoza, A., Milligan, Ben., Mills, C.S., Moreira-Arce, D., Nava, F. L., Oostra, V., ... Marquet, A.P. (2019). Research priorities for maintaining biodiversity's contributions to people in Latin America. *UCL Open: Environment* 1: 02.
- Peterson, A.T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213: 63-72.
- Peterson, A.T., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R.H., & Stockwell, D.R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626-629.
- Peterson, A.T., Cobos, M.E. & Jiménez, G.D. (2018). Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1429: 66-77.
- Peterson, A.T., Soberón, J., Person, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. & Araújo, M.B. (2011). *Ecological niches geographic distributions*. Princeton, New Jersey: Monographs in Population Biology, Princeton University Press.
- Phillips, S., Anderson, R. & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V.H., Watson, J.E.M., VanDerWal, J., Fuller, A.R., Pressey, L.R. & Possingham, P.H. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature Climate Change* 2: 448-452

- Prieto-Torres, D.A, Navarro-Sigüenza, A.G., Alarcon-Santiago, D. & Rojas-Soto, O.R. (2016). Response of the endangered tropical dry forests to climate change and the role of Mexican Protected Areas for their conservation. *Global Change Biology* 22: 364-379.
- Prieto-Torres, D.A, Rojas-Soto, O.R., Alarcn-Santiago, D., Bonaccorso, E. & Navarro-Sigüenza, A.G. (2019a). Distributional patterns of Neotropical seasonally dry forest birds: a biogeographical regionalization. *Cladistics* 35: 446-460.
- Prieto-Torres, D.A, Rojas-Soto, O.R., Alarcon-Santiago, D., Bonaccorso, E. & Navarro-Sigüenza, A.G. (2019b). Diversity, Endemism, Species Turnover and Relationships among Avifauna of Neotropical Seasonally Dry Forests. *Ardeola* 66:257-277.
- Prieto-Torres, D.A, Lira-Noriega, A. & Navarro-Sigüenza, A.G. (2020). Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forest. *Perspectives in Ecology and Conservation* 18: 19-30.
- Prieto-Torres, D.A., Nori, J. & Rojas-Soto, O.R. (2018). Identifying priority conservation areas for birds associated to endangered Neotropical dry forests. *Biological Conservation* 228: 205-214.
- Prieto-Torres, D.A., Sánchez-González, L.A., Ortiz-Ramírez, M.F., Ramírez-Albores, J.E., García-Trejo, E.A. & Navarro-Sigüenza, A.G. (2021). Climate warming affects spatio-temporal biodiversity patterns of a highly vulnerable Neotropical avifauna. *Climatic Change* 165: 57
- Prieto-Torres, D.A., Nuñez, R. L.E., Remolina, F. D & Arizmendi, M.C. (2021). Most Mexican hummingbirds lose under climate and land-use change: Long-term conservation implications. *Perspectives in Ecology and Conservation* 19: 1-12
- R-Core-Team. (2018) *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Riahi, K., Rao, S. & Krey V. (2011). RCP 8.5 a scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109: 33-57.
- Ríos-Muñoz, C.A. & Navarro-Sigüenza, A.G. (2012). Patterns of species richness and biogeographic regionalization of the avifaunas of the seasonally dry tropical forests in Mesoamerica. *Studies in Neotropical Fauna and Environmental* 47: 171-182.

- Rodríguez-Flores, C.I., Ornelas, J.F., Wethington, S. & Arizmendi, M.C. (2019). Are hummingbirds generalists or specialists? Using network analysis to explore the mechanisms influencing their interaction with nectar resources. *Plos ONE* 14: e0211855.
- Rojas-Soto, O.R., Victoria, S. & Ornelas, J.F. (2012). Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation* 21: 2671-2690.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. & Pounds, J.A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57-60.
- Ruiz, V., Savé, R. & Herrera, A. (2013). Multitemporal analysis of land use change in the terrestrial Protected Landscape Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Ecosistemas* 22: 117-123.
- Sánchez-González, L.A., Morrone, J.J. & Navarro-Sigüenza. (2008). Distributional patterns of the Neotropical humid montane forest avifaunas. *Biological Journal of the Linnean Society* 94: 175-194.
- Sánchez-Romero, R., Balvanera, P., Castillo, A., Mora, F., García-Barrios, L.E. & González-Esquivel, C.E. (2021). Management strategies, silvopastoral practices and socioecological drivers in traditional livestock systems in tropical dry forests: An integrated analysis. *Forest Ecology and Management* 479: 118506.
- Santiago-Alvarado, M., Montaña, A.G. & Espinosa, D. (2016) Áreas de endemismo de la Sierra Madre del Sur. En: V.I. Luna, D. Espinosa & M.R. Contreras (Editores), *Biodiversidad de la Sierra Madre del Sur: una síntesis preliminar*. Pp. 431-448. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Şekerciöglü, Ç.H., Primack, R.B. & Wormworth, J. (2012). The effects of climate change on tropical birds. *Biological Conservation* 148: 1-18.
- 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*. Diario Oficial de la Federación 30 diciembre, 2010.
- Sierra-Morales, P., Almazán-Núñez, R.C., Beltrán-Sánchez, E., Ríos-Muñoz, C.A & Arizmendi, M.C. (2016). Distribución geográfica y hábitat de la familia Trochilidae (Aves) en el estado de Guerrero, México. *Revista de Biología Tropical* 64: 363-376.

- Sierra-Morales, P., Almazán, N.R.C., Meléndez, H.A., García, V.C.S., Peñalosa, M.M.A., Alveréz, A.E.A., Contreras, R.A.I. & Fuentes, V.A.S. (2019). Nuevos registros e información sobresaliente sobre la distribución de algunas aves del estado de Guerrero, México. *Huitzil, Revista Mexicana de Ornitología* 20: 1-14.
- Soberon, J. & Peterson, A.T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10.
- Sonne, J., González, M. A.M., Maruyama, K.P., Sandel, B., Vizentin-Bugoni, J., Schleuning, M., Abrahamczyk, S., Alarcón, R., Araujo, C.A., Araújo, P.F., Mendes de Acevedo, S., Baquero, C.A., Cotton, A.P., Ingversen, T.T., Kohler, G., Lara, C., Las-Casas, G. F.M., Machado, O.A., Machado, G.C., Maglianesi, M.A., Moura, C.A., Nogués-Bravo, D., Oliveira, M.G., Oliveira, E.P., Ornelas, J.F., Rodrigues, C.L, Rosero-Lasprilla, L., Rui, A.M., Sazima, M., Timmermann, A., Varassin, G.I., Wang, Z., Watts, S., Fjeldsa, J., Jens-Christian, S., Rahbek, C & Dalsgaard, B. (2016). High proportion of smaller ranged hummingbird species coincides with ecological specialization across the Americas. *Proceedings B*. 283: 20152512
- Stohlgren, T.J., Jarnevich, C.S., Wayne, E.E. & Morisette, J. T. (2001). Bounding species distribution models. *Current Zoology* 57: 642-647.
- Terrible, L.C., Lima, R.M.S., Araújo, M.B., Bizão, N., Collevatti, R.G., Dobrovolski, R., Franco, A.A., Guilhaumon, F., de Souza Lima, J., Murakami, D.M., Nabout, J.C., de Oliveira, G., de Oliveira, L.K., Gonçalves Rabelo, S., Rangel, T.F., Mendes-Simon, L., Nascimento Soares, T., Pires de Campos Telles, M. & Diniz-Filho, J.A.F. (2012). Areas of climate stability of species ranges in the Brazilian Cerrado: disentangling uncertainties through time. *Naturaleza y Conservación* 10: 152-159.
- International Union for Conservation of Nature [IUCN]. (2018). *Red list of the Threatened species*. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org/>
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Ferreira de Siqueira M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., Van Jaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Miles, L., Ortega-Huerta, M.A., Peterson, A.T., Phillips O.L. & Williams, S.E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148.

- Thuiller, W., Lavorel, S. & Araújo, B.M. (2005). Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14: 347-357.
- Van, A.S. & Verbug, H.P. (2013). Land cover change or land-use intensification: simulating land system change with a global-scale land change model. *Global Change Biology* 19: 3648-3667.
- Verburg, H.P. & Overmars, P.K. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape Ecology* 24: 1167-1181.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T. & Sekiguchi, M. (2010). Improved climate simulation by miroc5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate* 23: 6312-6335.
- Wei, T. & Simko, V. (2017) R package “*corrplot*”: visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Disponible en: <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- Wilkening, J., Pearson, P.W., Mungi, N.A. & Bhattacharyya, S. (2019). Endangered species management and climate change: when habitat conservation becomes a moving target. *Wildlife Society Bulletin* 43: 11-20.
- Wisn, M.S., Hijmans, R.J., Li, J., Peterson, A.T., Graham, C.H., Guisan, A. & NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. (2008). Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* 14: 763-773.
- Young, B.F., Franke, I., Hernandez, P.A., Herzog, S.K., Paniagua, L., Tovar, C. & Valqui, T. (2009). Using spatial models to predict areas of endemism and gaps in the protection of Andean slope birds. *Auk* 126: 554-565.