



Estudio del cambio climático y su efecto en las aves en México: enfoques actuales y perspectivas futuras.

Teresa Patricia Feria Arroyo,¹ Gerardo Sánchez-Rojas,² Raúl Ortiz-Pulido,^{2*} Jessica Bravo-Cadena,² Edith Calixto Pérez,³ Jon M. Dale,⁴ Jennifer N. Duberstein,⁵ Patricia Illoldi-Rangel,⁶ Carlos Lara⁷ y Jorge Valencia-Herverth.²

¹Biology Department, The University of Texas-Pan American. 1201 West University Drive Edinburg, Texas, 78539, EUA.

²Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Apartado Postal 69, Pachuca, Hidalgo, 42001, México. Correo electrónico: *raulortizpulido@yahoo.com.

³Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Av. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Colonia Parques del Pedregal, Delegación Tlalpan, 14010, México, DF.

⁴Texas Environmental Studies and Analysis. Kingsville, Texas, 78363, EUA.

⁵Sonoran Joint Venture. 738 North 5th Avenue, Suite 102, Tucson, Arizona, 85705, EUA.

⁶Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04500, México, DF.

⁷Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Km 10.5 Autopista Tlaxcala-San Martín Texmelucan, San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala, 90120, México.

Resumen

El cambio climático está impactando la biodiversidad en el planeta. En México diferentes líneas de investigación se han desarrollado para estudiar los efectos del cambio climático en la distribución de su avifauna. Entender qué enfoques se usan en el país para estudiar este fenómeno puede ayudar a planear mejor los esfuerzos de conservación, determinar qué especies y sitios serían los más afectados, ubicar qué lugares y qué proyectos deberían recibir más atención para asignar los pocos recursos económicos existentes de manera más eficiente. En este documento describimos los enfoques usados por ocho grupos de investigación que estudian los efectos del cambio climático en la avifauna mexicana. El 87.5% usó tres escenarios de cambio climático: A1B, A2 y B2. Todos los grupos, salvo uno, usaron las variables de WorldClim. El 62.5% usó los modelos de circulación general canadiense (CCCMA) y australiano (CSIRO) y el 87.5% usó GARP o MaxEnt para modelar la distribución de especies. Se requiere avanzar en cuatro áreas: (1) elaborar mapas climáticos con mayor resolución, (2) incrementar la colaboración entre grupos de investigación, (3) realizar estudios de identificación de especies y áreas en mayor riesgo, y (4) aplicar los conocimientos que se tienen a la fecha. Proponemos 17 recomendaciones que, de seguirse, podrían determinar que el desarrollo futuro de estas cuatro áreas influya en la conservación de las aves habitando en México. Los resultados de este trabajo podrían ayudar a los científicos, tomadores de decisiones y manejadores de recursos naturales a planear estrategias de conservación apropiadas para el futuro.

Palabras clave: avifauna mexicana, cambio climático, modelos de distribución de especies.

Study of the climate change and its effect on birds in Mexico: present focuses and future perspectives.

Abstract

Global climate change is affecting the world's biodiversity. In Mexico, several lines of research have been developed to forecast the effects of climate change on bird distributions. Knowing which methods are used in Mexico to study the phenomenon can help us to better plan our conservation efforts, determine which species and sites could be most affected, establish which sites and projects must receive more attention to mitigate climate change impacts, and assign limited economic resources in a more efficient way. Here we explore the different approaches used by eight research groups that study the effects of climate change on Mexican avifauna. To date, 87.5% of these groups used three climate change scenarios: A1B, A2 and B2. All groups except one used climatic variables gathered from WorldClim. Further, 62.5% of the groups use the Canadian (CCCMA) and Australian (CSIRO) general circulatory models and 65% use GARP and MaxEnt species distribution models. There is a need to (1) develop climatic maps with higher resolution, (2) increase collaboration among research groups, (3) identify individual species and areas at major risk, and (4) apply the knowledge already obtained. We propose 17 recommendations for the development of future studies of the effects of global climate change on birds in Mexico. The results of this work could allow policy makers and land managers to plan the most appropriate conservation strategies for the future.



Key words: Mexican avifauna, climate change, species distribution models.

HUITZIL (2013) 14(1):47-55

Introducción

Actualmente, nuestro planeta está siendo afectado por un cambio climático global (CCG). Este fenómeno comprende, entre otros factores, un incremento sostenido en la temperatura que a su vez modifica los patrones de precipitación a nivel mundial. Se ha registrado que la temperatura se ha incrementado en 0.74°C durante el periodo 1906-2005 y que este valor se duplica en las zonas polares (IPCC 2007). Por otra parte, la precipitación se incrementó significativamente en algunas regiones durante el periodo 1900-2005, por ejemplo, en el norte y sur de América, mientras que las áreas afectadas por sequías se han incrementado a nivel mundial desde 1970 (Sáenz-Romero *et al.* 2010). En México, se han presentado dos sequías de 10 años de duración, una en 1945 y otra en 1994 (Stahle *et al.* 2009), que podrían ser consecuencia del CCG. De continuar este calentamiento, se prevé que la temperatura podría incrementarse entre 1.1 y 6.4°C para el año 2100 (IPCC 2007). Los efectos de estos cambios ya se están reportando en diversos grupos taxonómicos como plantas y animales terrestres, de agua dulce y marinos, a nivel de poblaciones o especies (Parmesan 2006). Las repercusiones en la composición de ensambles de especies y los patrones de biodiversidad de las comunidades, así como el flujo de materia y energía de los ecosistemas, todavía permanecen inciertas.

Entre los grupos de fauna que han sido más estudiados por su respuesta rápida al CCG están las aves (Crick 2004, Sekercioglu *et al.* 2008). La gran cantidad de estudios se debe a que, comparado con otros grupos biológicos, se ha acumulado gran cantidad de conocimiento sobre ellas en los últimos 300 años, su taxonomía alfa está relativamente bien establecida, hay muchos profesionales y aficionados a las aves (lo que proporciona numerosos registros verificados), su muestreo es relativamente fácil y poco costoso, y en algunas áreas, como en EUA y Europa, hay seguimiento de su distribución y abundancia por periodos relativamente largos (*e. g.*, Christmas Bird Count, Breeding Bird Survey).

Estas características han facilitado que se hayan realizado estudios que evidencian modificaciones en aspectos básicos de la biología de las aves posiblemente debido al CCG. Entre estos aspectos están sus periodos de migración y anidación, sus tamaños poblacionales, la distancia que migran y su distribución (*e. g.*, Crick 2004, Parmesan 2006, Peterson *et al.* 2010). Además, existen predicciones que indican que, debido en parte al cambio climático pero también debido al cambio de uso del

suelo, muchas especies de aves, sobre todo las endémicas y especialistas, se podrían extinguir en las siguientes décadas por reducción de su hábitat (Sekercioglu *et al.* 2004, Thomas *et al.* 2004). Por todo ello, las aves pueden ser usadas en la evaluación de los efectos de cambios de la calidad de su hábitat debido a los cambios en los patrones de temperatura y precipitación (Bock y Zach 2004), pues permiten monitorear el efecto del CCG en ecosistemas naturales o con influencia humana.

Si las aves son perturbadas negativamente por el CCG, esto afectará a los humanos directa o indirectamente debido a que las aves son proveedoras de servicios ecosistémicos tales como la polinización, dispersión de semillas, control de plagas, entre otros. Se ha calculado que las aves que consumen néctar polinizan cerca del 15% de las plantas en muchos sitios de América (Buzato *et al.* 2000); que las aves consumidoras de frutos dispersan entre el 30 y 70% de las semillas de plantas leñosas en América y Australia (Willson *et al.* 1989), y que las aves que consumen insectos pueden controlar entre el 20 y 70% de las poblaciones de invertebrados y reducir hasta en 10% las plagas de cultivos (Sekercioglu 2006). Estos y otros procesos podrían verse afectados al resentir las aves el CCG.

El efecto del CCG sobre una especie de ave podría ser entendido mejor si se consideran escalas de análisis a una resolución fina (Peterson *et al.* 2010). Esto es debido a que comúnmente en unidades de análisis de ~ 50 km de resolución se asume que el clima es homogéneo en el paisaje; esto impide identificar microrefugios donde las especies pueden persistir a pesar del CCG (Ashcroft *et al.* 2009). En este sentido, cobra relevancia el hacer estudios a resolución más fina y a nivel país ya que esta información podría ayudar a conservar mejor la avifauna y sus servicios ambientales a este nivel.

Se han publicado pocos estudios sobre el efecto del CCG en las aves en México. En el país, los trabajos de T. Peterson (University of Kansas), A. Navarro (Facultad de Ciencias, UNAM) y E. Martínez Meyer (Instituto de Biología, UNAM) son pioneros. Algunos de estos trabajos sugieren que algunas especies podrían extinguirse localmente o ampliar su distribución dependiendo de sus capacidades de dispersión (Peterson *et al.* 2001), de su amplitud de nicho (Peterson *et al.* 2002) y de su nicho actual (Bravo-Cadena 2010). Según Peterson *et al.* (2002) el recambio de las especies en las comunidades de aves en México podría superar el 40% para el año 2055, ya que muchas especies podrían desaparecer o ser desplazadas por otras. Sin embargo,

estos cambios podrían ser mayores pues los estudios citados no han considerado el efecto del cambio de uso del suelo, fragmentación y deterioro del hábitat o la urbanización.

A pesar del esfuerzo hecho a la fecha en México, falta realizar estudios que, entre otras cosas, ayuden a determinar el efecto del CCG en grupos de aves en peligro, en zonas aun no estudiadas y en aves que proveen servicios ecosistémicos que repercuten directamente en el bienestar humano. Los resultados de estos trabajos podrían permitir planear mejor los esfuerzos de conservación, determinar qué especies y sitios serían los más afectados, ubicar qué lugares y qué proyectos deberían recibir más atención para mitigar el efecto del cambio climático, y asignar los pocos recursos económicos existentes de manera más eficiente. Para que los estudios futuros tuvieran mayor utilidad, estos deberían atacar puntos clave de nuestro desconocimiento sobre el tema. Sin embargo, a la fecha no se ha realizado una revisión sobre lo que se hace en el tema en el país, sobre lo que conocemos, lo que falta por investigar, ni del conocimiento que ya se puede aplicar en la conservación.

El objetivo de este escrito es prospectivo y propositivo. Es prospectivo porque buscamos describir aquí algunos de los enfoques usados en México para entender el posible efecto del CCG en las especies de aves. En particular, deseamos determinar qué escenarios de cambio climático se usan, qué variables ambientales se ocupan, cuáles modelos de circulación general son utilizados, qué algoritmos se trabajan, qué grupos de especies y temas son modelados o estudiados en México, y qué años se contemplan. El escrito también es propositivo porque, a través de un ejercicio colegiado de reflexión, planteamos las necesidades que, desde nuestro punto de vista, se tienen a nivel país y las acciones que se podrían realizar para avanzar mejor en el entendimiento del efecto del CCG en las aves que lo habitan, así como en la aplicación práctica de lo ya conocido.

Materiales y métodos

Para poder cumplir nuestro objetivo realizamos una reunión científica sobre el tema (Ortiz-Pulido *et al.* 2011). La reunión se organizó en torno a la exposición de nueve ponencias en las que participaron 30 investigadores de 19 instituciones y cuatro países. En estos trabajos se evidenció el efecto potencial del CCG en cerca de 300 especies de aves distribuidas en el país. Entre los temas se consideró el efecto del CCG en especies con alimentación especializada (colibríes y búhos), restringidas a ciertas zonas geográficas (oeste de México), especialistas de hábitat (bosque mesófilo de montaña) y consideradas bajo alguna categoría de riesgo [e. g., especies incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010)]. Además, se plantearon

opciones para establecer sistemas de monitoreo que permitan documentar, a escala fina, el CCG y determinar el efecto de incorporar a los análisis otras amenazas, como la deforestación, fragmentación y deterioro del hábitat. Una reflexión general, resultado de la reunión, nos permitió elaborar una lista consensuada de los enfoques usados a la fecha, así como otra de vacíos de información.

A los representantes de cada uno de los ocho grupos de investigación participantes en la reunión científica se les preguntó qué escenarios de cambio climático, variables ambientales, modelos de circulación general y algoritmos para la construcción de nichos ecológicos trabajaban, así como qué años, grupos de especies y temas modelaban o estudiaban en un contexto de CCG en México. Sus respuestas permitieron determinar el porcentaje de grupos que usaba, por ejemplo, un modelo particular de circulación general o un escenario de cambio climático. En los resultados analizamos la información de los grupos de investigadores participantes en la reunión científica, no a nivel de investigadores individuales ni de instituciones. Creemos que los ocho grupos representan cerca del 70% de los grupos que actualmente realizan investigación sobre el efecto del CCG en aves en México. Estamos conscientes de que deben también existir otros esfuerzos de los que no tenemos conocimiento, pero hicimos todo lo posible por identificarlos. Una consulta realizada a finales del año 2011 en la lista electrónica de discusión "Ornitológica de México", mantenida por CIPAMEX desde el año 2001, donde participan 597 personas interesadas en la ornitología mexicana, sólo nos permitió detectar otras dos personas más trabajando en el tema, pero en ambos casos en una fase inicial. Desafortunadamente, otros dos grupos que se sabe que trabajan el tema no enviaron respuesta a la solicitud de información que se les mandó. Un estudio más completo debería incluir a todos los grupos.

Resultados

Las instituciones donde están los grupos que participaron en nuestra reunión científica se ubican principalmente en el centro de México, en las ciudades de Pachuca, Tlaxcala, Xalapa y DF, aun cuando hay dos grupos ubicados físicamente en Arizona y Texas, EUA (Cuadro 1). El 50% de los grupos realiza estudios a nivel nacional, mientras que el 25% a nivel regional o estatal (Cuadro 1), lo que conlleva a que prácticamente la totalidad de los tipos de vegetación, zonas climáticas y geográficas del territorio nacional estén siendo estudiadas por estos grupos. Los grupos de investigación ocupan cinco escenarios climáticos planteados por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), siendo el más usados el A2 (en 87.5% de los grupos) y el B2 (75%; Cuadro 1). El escenario A2

asume una población humana mundial en continuo crecimiento, degradación y pérdida del bosque, un alto nivel de contaminación y de emisiones de CO₂; en este escenario, el desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y el crecimiento económico por habitante, y el cambio tecnológico es fragmentado y lento. El escenario B2 asume estrategias de conservación de recursos y energía con un decremento en la producción de emisiones de CO₂ a mitad del siglo; describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental (IPCC 2007). En cuanto a variables ambientales, el 87% de los grupos usan las facilitadas por WorldClim (Hijmans *et al.* 2005); únicamente uno de los grupos (CONABIO-UNAM) trabajó directamente con datos de temperatura y precipitación proporcionados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, generando sus propias coberturas de clima. Los grupos de investigadores han utilizado ocho modelos de circulación general, siendo dos los más usados (62.5% de los grupos) el CCCMA (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, por sus siglas en inglés) y el CSIRO (Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, por sus siglas en inglés), y utilizan más frecuentemente MaxEnt (87.5%) como algoritmo para general modelos de nicho ecológico, aunque GARP es también comúnmente usado (50%; Cuadro 1).

El modelado de la distribución de las aves habitando en México se ha hecho considerando cinco años ubicados entre 2020 y 2080. El año más modelado es el año 2050 (en 75% de los grupos; Cuadro 1), aunque los años 2020 y 2080 son también comúnmente usados (50% en ambos casos). Las especies de aves más estudiadas son las prioritarias para su conservación (50%) aunque también las endémicas son estudiadas (37.5%; Cuadro 1). Los temas más abordados son los de distribución (75%) y conservación (50%; Cuadro 1).

Nuestro análisis de necesidades (Cuadro 2) nos permitió concluir que en México: (1) deben realizarse trabajos con mayor resolución espacial, (2) es necesario iniciar colaboraciones entre los distintos grupos para alcanzar conclusiones generales, (3) es conveniente identificar especies y áreas de mayor riesgo para enfocar esfuerzos, y (4) se deben realizar más estudios básicos (por ejemplo, para poner a prueba predicciones de tolerancia de una especie a los cambios en el nivel de mar o desaparición de su hábitat e interactuantes) y de aplicación directa (por ejemplo, incorporar resultados a la

normatividad vigente; Cuadro 2). Proponemos 17 recomendaciones que pueden cubrir estas necesidades en el país. Las necesidades de estudios y de aplicación son las que agrupan un mayor número de acciones propuestas (Cuadro 2).

Discusión

Nuestro análisis nos permite decir que los grupos de investigación estudiando el efecto del CCG en las aves en México usan prácticamente los mismos escenarios climáticos, variables ambientales, algoritmos para estimar la distribución de las especies y años de modelación (Cuadro 1). El análisis también nos permite entender que en México se están siguiendo pautas mundiales (Crick 2004) pues estamos en un momento de modelado predictivo y nos falta desarrollar métodos para probar las predicciones elaboradas a la fecha. Aun cuando no es factible probar qué pasará en, por ejemplo, el año 2080 sino hasta que lleguemos a ese año, se podría empezar a probar experimentalmente la tolerancia de las especies a las condiciones predichas en los modelos (*e. g.*, utilizando modelos fisiológicos que se han desarrollado para lagartijas; Sinervo *et al.* 2010). En este sentido, las necesidades detectadas y las acciones propuestas podrían ayudarnos a planear mejor las estrategias a seguir en el futuro, sobre todo si queremos ser más eficientes en la conservación de las aves.

Además de tener enfoques similares para estudiar el CCG, los grupos de investigación considerados utilizan las mismas herramientas. Esto tiene ventajas y desventajas. Como ventaja, a corto plazo, los patrones detectados por los diferentes grupos estarán razonablemente estandarizados y, por lo tanto, serán comparables. Como desventaja, a largo plazo, esta homogeneidad tal vez limitará la exploración y contrastación de modelos alternativos. Por ello, creemos que es conveniente continuar explorando, generando o comprendiendo mejor otras opciones de escenarios climáticos, variables ambientales y modelos de circulación general. En este sentido, para México hay opciones con un énfasis más local. Aunque reconocemos que la distribución de una especie no está acotada por límites políticos, para los efectos de este trabajo dichas aproximaciones son pertinentes. Este es el caso de las bases de datos climáticas desarrolladas por Sáenz-Romero *et al.* (2010) y Téllez *et al.* (2010) que podrían presentar menor incertidumbre que la de WorldClim (Hijmans *et al.* 2005). Es conveniente explorar estas otras opciones.

Cuadro 1. Grupos que realizan investigación sobre el efecto del cambio climático en aves presentes en México y que asistieron a la reunión de Cambio Climático y sus efectos en las aves de México, en el XI Congreso para el estudio y conservación de las aves en México, en octubre de 2011. Se indican datos relevantes de cada grupo sobre escenarios y modelos usados, así como años, grupos de aves, temas y escalas analizadas. El orden en que se presentan los grupos es alfabético, usando para ello el apellido del encargado principal.

Grupo	Encargado	Escenario	Modelo de circulación general ¹	Algoritmo para modelar el nicho ecológico ²	Año de modelación	Grupo de aves	Tema	Escala
CONABIO-UNAM	E. Calixto	A1	ECHAM5/MPIUKHADGEM	Bioclim	2030	Prioritarias	Distribución	Nacional
	Pérez, E.	B1	GFDL CM 2.01	GARP	2050			
	Martínez Meyer	A2 B2		Envelope Score Support Vector Machine				
Sonoran Joint Venture PRBO Conservation Science	J.N. Duberstein, G. Ballard	A2	BCCR_BCM2 CSIRO INMCM3.0 MIROC3.2 NCAR_CCSM3_0	MaxEnt	2060	Prioritarias	Conservación	Regional (norte de México)
The University of Texas-Pan American	T.P. Feria	A2	CCCMA	MaxEnt	2020	Migratorias Endémicas	Distribución Conservación	Nacional
		A1B	CSIRO		2050			
		B2	HADLEY		2080			
IB-UNAM	P. Illoldi	A2 B2	IPCC	MaxEnt	2020 2050 2080	Endémicas	Distribución Conservación	Nacional
CICB-UAT	C. Lara	A1B	CCCMA CSIRO	MaxEnt	2050	Colibríes	Distribución	Nacional
CIB-UAEH-Aves	R. Ortiz-Pulido	A2	CCCMA	GARP	2020	Colibríes	Distribución	Estatal (Hidalgo)
		B2	HADCM3 CSIRO	MaxEnt	2050 2080	Búhos Prioritarias	Conservación Análisis de modelos	
INECOL	O. Rojas-Soto	A2 B2	CCCMA CSIRO HAD3	GARP MaxEnt	¿?	Endémicas	Bosque mesófilo de montaña	Regional (bosque mesófilo)
CIB-UAEH-Conservación	G. Sánchez Rojas	A2 B2	CCCMA HADCM3 CSIRO HADLEY	GARP MaxEnt	2020 2050 2080	Prioritarias	Distribución Selección de áreas prioritarias Métodos de modelación	Estatal (Hidalgo)

¹BCCR_BCM2_0, Bjerknes Centre for Climate Research, Norway, BCM2.0 Model; CCCMA, Canadian Center for Climate Modelling and Analysis; CSIRO, Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation; ECHAM, German Climate Research Center /Hamburg Model #4; GFDL, US Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; HADCM3, Hadley Centre couple model (Inglaterra); HADLEY, Hadley Centre UK Met. Office's Unified Model version 2; INMCM3.0, Institute for Numerical Mathematics, Russia; MIROC3.2, Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies y Frontier Research Center for Global Change; NCAR_CCSM3, National Center for Atmospheric Research, Community System Climate Model version 3.0.

²GARP, Genetic Algorithm for Rule Set Production; MaxEnt, Maximum Entropy approach (Phillips *et al.* 2006).

Cuadro 2. Resumen de necesidades y recomendaciones correspondientes detectadas por los autores en cuanto a estudios relacionados con el cambio climático y la avifauna que habita en México. El orden de los temas indicados en cada columna no está en función de algún tipo de prioridad, siendo el orden sólo de carácter enunciativo.

Necesidades	Recomendaciones
Resolución espacial	Elaborar nuevos mapas climáticos con resolución más fina (<1 km ²). A la fecha, en México se cuenta con mapas climáticos de aproximadamente 1 km ² ; dada la selectividad climática y de vegetación de las aves son necesarios mapas de resolución de al menos 1 ha que no sean extrapolaciones burdas de los mapas de 1 km ² .
Colaboración	<p>Promover trabajo conjunto de especialistas y fomentar la interacción entre diferentes campos del conocimiento (<i>e. g.</i>, evolución, ecología de poblaciones, interacciones ecológicas, genética, fenología, ecología del paisaje, biodiversidad).</p> <p>Crear una red interinstitucional e interdisciplinaria enfocada al estudio del efecto del cambio climático en las aves del país, tratando de incluir en ella a otros grupos no considerados en este estudio.</p>
Estudios básicos	<p>Realizar estudios para identificar áreas y especies potenciales con mayores riesgos y contextualizarlos ecológicamente (hábitats, biomas), biogeográficamente (regiones, provincias, ecoregiones) y políticamente (estados, municipios), y con ello poder definir sitios prioritarios para monitoreo, restauración y protección.</p> <p>Identificar aquellas especies ecológicamente importantes (por los tipos de interacciones y servicios ambientales que brindan).</p> <p>Incluir, en los estudios, el efecto potencial del CCG en conjunto con el desarrollo urbano, rural y agrícola. A través de esta inclusión se contestarían preguntas tales como ¿cuál es el efecto que tiene el CCG en la avifauna bajo distintos escenarios de desarrollo urbano?</p> <p>Realizar trabajo experimental para poner a prueba las predicciones.</p> <p>Analizar el grado de respuesta de las especies y su sintonía con su ambiente (apropiada <i>vs.</i> inapropiada) en un contexto de cambio climático. En este caso, se podrían responder preguntas tales como ¿qué especies responderán incrementando su área de distribución?</p> <p>Determinar los factores intrínsecos (<i>e. g.</i>, adaptabilidad fenotípica y genotípica, habilidad de dispersión, especialización ecológica, tamaño poblacional) y extrínsecos (<i>e. g.</i>, incremento en la frecuencia de eventos extremos, pérdida de hábitat o calidad del hábitat, cambios en la distribución de otras especies) que podrían inhibir una respuesta adecuada de la especie al cambio climático.</p> <p>Evaluar cómo se modificarán las relaciones interespecíficas entre aves y sus interactuantes, y cuál podría ser el efecto de esto en la distribución futura de las especies. En este tema se podría responder a preguntas como ¿qué características de las redes de interacción mutualista establecidas entre aves y plantas determinarían un mayor o menor efecto en la distribución futura de las aves?</p> <p>Definir los modelos de circulación general más representativos.</p>
Aplicación	<p>Evaluar factibilidad de las ANP en la conservación futura e incorporar los efectos esperados del cambio climático en las estrategias de manejo en ANP.</p> <p>Incorporar resultados a la normatividad vigente (<i>e. g.</i>, en la NOM-059-SEMARNAT 2010).</p> <p>Ubicar microrefugios para especies.</p> <p>Planear estrategias que faciliten la adaptación ecológica de las especies.</p> <p>Incluir hallazgos en planes de estudio de licenciatura y posgrado.</p> <p>Hacer accesibles a los usuarios finales (<i>e. g.</i>, directores de reservas, tomadores de decisiones, políticos, ONG) los resultados de las predicciones.</p>

Asimismo, detectamos que la mayoría de los grupos incluidos en el análisis son usuarios de las técnicas de generación de modelos de nicho ecológico y de distribución de especies, pero aun no han pasado a la validación de los modelos obtenidos (con excepción de ejemplos como Feria 2007, Mota 2011) o a la realización de investigaciones que demuestren, a través de estudios de campo o laboratorio, los efectos potenciales del CCG

en aspectos como la fisiología y comportamiento de las especies (*e. g.*, Burger 1998), la disponibilidad de alimento y la estructura de las redes de interacciones (*e. g.*, Lara-Rodríguez *et al.* 2012). Esta falta de validación debe de ser revertida, pues muchos de los resultados de estas investigaciones podrían estarse utilizando como base para plantear estrategias de conservación a nivel local (*e. g.*, municipios y estados). También detectamos

que el conocimiento científico generado hasta la fecha en el área ha tenido poca influencia o aplicación en el desarrollo de políticas públicas relacionadas con la conservación de las aves en el país. En el área de CCG y su efecto en la avifauna, tanto la falta de validación de los modelos obtenidos como la ausencia de aplicación es una constante a nivel mundial (Crick 2004), pues hay una desvinculación entre el conocimiento adquirido y su aplicación. Por ejemplo, a la fecha, los resultados obtenidos en aves en el país no han tenido un efecto en la legislación ambiental en México. Aplicar los conocimientos adquiridos podría ser vital para la conservación de algunas especies de aves, pues es posible que varias especies residentes o especialistas de hábitat estén sufriendo la desaparición de las condiciones ambientales en las que se distribuyen, situación que seguramente se ve agravada por otros fenómenos, como el cambio de uso de suelo cuyo efecto es difícil de diferenciar del ocasionado por el CCG. En el futuro, sería conveniente considerar estos resultados en, por ejemplo, la revisión de las categorías que tienen las especies de aves en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010), en el diseño de redes de áreas naturales protegidas y de Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (Arizmendi y Márquez 1999) y en el establecimiento de estrategias de manejo sustentable de los recursos naturales. Estas y otras necesidades de aplicación se detallan en el Cuadro 2.

Aun cuando todas las acciones propuestas en el Cuadro 2 son relevantes de llevar a cabo, creemos que las planteadas en las necesidades de colaboración y aplicación son prioritarias. Del análisis de la ubicación geográfica de los ocho grupos de investigación analizados es evidente que la mayoría de los grupos que están trabajando en aspectos de CCG y aves se concentra en el centro de México (Cuadro 2). Por ello, es necesaria la creación de vínculos académicos con otros grupos de investigación localizados en zonas del país poco representadas. Esto se podría lograr, por ejemplo, a través de la creación de una red interinstitucional de investigadores trabajando en el tema. A través de la colaboración se podría avanzar de manera colegiada y adquirir y contrastar el conocimiento más rápidamente. Por su parte, a través de la aplicación se podría reducir la brecha entre los creadores del conocimiento, los tomadores de decisiones y los que aplican este conocimiento. Al considerar el efecto del CCG en las aves, un mecanismo de transferencia de información que contemple colaboración y aplicación podría resultar en acciones puntuales que permitirían la conservación de las aves en México; además de que retroalimentaría a los participantes al plantear nuevas interrogantes y necesidades.

Por último, es notorio que los grupos de investigación trabajando el tema en el país se centran

mayoritariamente en utilizar modelos de nicho ecológico (e. g., GARP, MaxEnt) con los que se construyen distribuciones potenciales de las especies para inferir los posibles efectos del CCG en la avifauna, dejando a un lado otras aproximaciones. Otros enfoques que sería interesante que se exploraran son: (1) usar correlaciones entre el clima y la fecha de primer arribo en la migración, la fecha de puesta o la velocidad de migración (e. g., Barton y Sandercock 2011); (2) ocupar indicadores de stress ambiental como parámetros demográficos, análisis de hematocrito, declinación de especies de alta montaña o efectos en las poblaciones por fuera de la temporada de anidación (e. g., Byrd *et al.* 2011), y (3) utilizar la aproximación de “comunidades no análogas” (e. g., Holt *et al.* 2011). Todas estas opciones ofrecen muchas posibilidades de investigación. Por ejemplo, el enfoque de “comunidades no análogas” permite explorar cuál sería el efecto de que el nicho ecológico realizado de las especies se pudiera modificar por efecto del CCG. Así, se puede modelar cuándo y dónde podrían aparecer y desaparecer este tipo de comunidades considerando respuestas latitudinales, tamaño del cuerpo, tamaño de la distribución actual, tolerancia a efectos humanos, resistencia fisiológica, respuesta a eventos climáticos extremos, funciones del ecosistema y biodiversidad, entre otros aspectos. En todo caso, sería conveniente que en México se exploraran otros modelos alternativos al de correlación distribución-clima, pues esta última aproximación asume que en el futuro se mantendrá la correlación abiótica distribución-clima, lo cual podría no ser cierto en todos los casos.

En síntesis, en este escrito presentamos los enfoques que se usan en México para el estudio del efecto del CCG en la distribución de las aves, así como las necesidades y acciones que nos permitirían conocer y aplicar más lo que sabemos sobre el efecto de este fenómeno en especies de aves habitando en México. A través de un análisis colegiado concluimos que existen cuatro tipos de necesidades que podrían ser cubiertas con 17 recomendaciones. Creemos que, si los estudios y trabajos futuros en el país se enfocan a desarrollar las acciones indicadas aquí, a corto plazo podríamos estar aplicando nuestro conocimiento para enfrentar de mejor manera los efectos del CCG en la avifauna mexicana.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo económico de la CONABIO, así como a CIPAMEX y a la Universidad Autónoma de Sinaloa por la ayuda logística prestada para realizar nuestra reunión en el XI Congreso para el Estudio y Conservación de las Aves en México. De manera particular cada autor agradece a su institución (CONABIO, CICB-UAT, INECOL, Sonoran Joint Venture, Texas Environmental Studies and Analysis, UAEH, UNAM y The University of Texas-Pan

American) el apoyo recibido que permitió recabar el conocimiento y experiencia presentados en este documento. A O. Rojas, M.A. Martínez y dos revisores anónimos por las sugerencias hechas a una versión

preliminar del este trabajo. Agradecemos a CUMEX, la Universidad de Quintana Roo y la UAEH por apoyar una estancia académica de ROP durante la cual desarrolló versiones iniciales de este escrito.

Literatura citada

- Arizmendi, M.C. y L. Márquez Valdelamar. 1999. Áreas de importancia para la conservación de las aves en México. CIPAMEX, CONABIO. México, DF.
- Ashcroft, M.B., L.A. Chisholm y K.O. French. 2009. Climate change at the landscape scale: predicting fine grained spatial heterogeneity in warming and potential refugia for vegetation. *Global Change Biology* 15:656-667.
- Barton, G.G. y B.K. Sandercock. 2011. Regional climate conditions and variation in migration timing in Northern California. Pp. 5. *In*: 129th Stated meeting of the American Ornithologists' Union. American Ornithologists' Union. Jacksonville, Florida, EUA.
- Bock, C.E. y F.J. Zach. 2004. Avian habitat evaluation: should counting birds count? *Frontiers in Ecology and the Environment* 2:403-410.
- Bravo-Cadena, J. 2010. Cambio climático global: efecto en algunas especies de aves en peligro en el estado de Hidalgo, México. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México.
- Burger, M. 1998. Physiological mechanisms limiting the northern boundary of the winter range of the northern cardinal (*Cardinalis cardinalis*). Tesis doctoral, Universidad de Michigan. Ann Arbor, Michigan, EUA.
- Buzato, S., M. Sazima y I. Sazima. 2000. Hummingbird-pollinated floras at three atlantic forest sites. *Biotropica* 32:824-841.
- Byrd, A.J., B.J. Olsen, R.L. Holberton y D.C. Evers. 2011. Common Loon (*Gavia immer*) settlement behaviour and reproductive success in an era of climatic change. Pp. 11. *In*: 129th Stated meeting of the American Ornithologists' Union. American Ornithologists' Union. Jacksonville, Florida, EUA.
- Crick, H.Q.P. 2004. The impact of climate change on birds. *Ibis* 146:48-56.
- Feria, T.P. 2007. Understanding the geographic distribution of species: an evaluation of different methods for modeling species distributions and a test of the niche characteristics hypotheses. Tesis de doctorado, University of Missouri-Saint Louis. Saint Louis, Missouri, EUA.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978.
- Holt, R.D., M. Urban, J. Tewksbury, G.E. Gilchrist y S.E. Gilman. 2011. Theoretical perspectives on non-analog communities. Pp. 22. *In*: 129th Stated meeting of the American Ornithologists' Union. American Ornithologists' Union. Jacksonville, Florida, EUA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Suiza.
- Lara-Rodríguez, N.Z., R. Díaz-Valenzuela, V. Martínez-García, E. Mauricio-López, S.A. Díaz, O.I. Valle, A.D. Fisher, C. Lara y R. Ortiz-Pulido. 2012. Redes de interacción planta-colibrí del centro-este de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 83:569-577.
- Mota, C. 2011. Distribución geográfica y ambiental del Chivizcoyo *Dendrotyx barbatus* (Aves: Odontophoridae) en México y efectos en su conservación. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Tlaxcala, Tlaxcala, México.
- Ortiz-Pulido, R., G. Sánchez-Rojas y T.P. Feria-Arroyo. 2011. Simposium: Perspectivas y oportunidades al considerar el cambio climático y su efecto en las aves en México. Pp. 41. *In*: Libro de resúmenes del XI Congreso para el estudio y conservación de las aves en México. CIPAMEX, Universidad Autónoma de Sinaloa. Mazatlán, Sinaloa, México.
- Parnesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematic* 37:637-669.
- Peterson, A.T., M.A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R.H. Buddemeier y D.R.B. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416:626-629.
- Peterson, A.T., S. Menon y X. Li. 2010. Recent advances in the climate change biology literature: describing the whole elephant. Wiley

- Interdisciplinary Reviews: Climate Change 1(4):548-555.
- Peterson, A.T., V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R.W. Buddemeier y A.G. Navarro-Sigüenza. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modelling* 144:21-30.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson y R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Sáenz-Romero, C., G.E. Rehfeldt, N.L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B.A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102:595-623.
- Sekercioglu, C.H. 2006. Increasing awareness of avian ecological function. *Trends in Ecology and Evolution* 21:464-471.
- Sekercioglu, C.H., G.C. Daily y P.R. Ehrlich. 2004. Ecosystem consequences of bird declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101:18042-18047.
- Sekercioglu, C.H., S.H. Schneider, J.P. Fay y S.R. Loarie. 2008. Climate change, elevational range shifts, and bird extinctions. *Conservation Biology* 22:140-150.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 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. México, DF. (30 de diciembre 2010).
- Sinervo, B., F. Mendez-de-la-Cruz, D.B. Miles, B. Heulin, E. Bastiaans, M. Villagrán-Santa Cruz, R. Lara-Resendiz, N. Martínez-Méndez, M.L. Calderón-Espinosa, R.N. Meza-Lázaro, H. Gadsden, L.J. Ávila, M. Morando, I.J. de la Riva, P.V. Sepulveda, C.F.D. Rocha, N. Ibarguengoyta, C.A. Puntriano, M. Massot, V. Lepetz, T.A. Oksanen, D.G. Chapple, A.M. Bauer, W.R. Branch, J. Clobert y J.W. Sites. 2010. Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science* 328:894-899.
- Stahle, D.W., E.R. Cook, J. Villanueva Díaz, F.K. Fye, D.J. Burnette, R.D. Griffin, R. Acuña Soto, R. Seager y R.R. Heim Jr. 2009. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos* 90:89-90.
- Téllez, O., M.A. Hutchinson, H.A. Nix y P. Jones. 2010. Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México. Pp. 15-23. *In*: G. Sánchez, C. Ballesteros y N.P. Pavón (eds.). Cambio climático: aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México.
- Thomas, C.D., A. Cameron, R.E. Green, M. Bakkenes, L.J. Beaumont, Y.C. Collingham, B.F.N. Erasmus, M.F. De Siqueira, A. Grainger y L. Hannah. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145-148.
- Willson, M.F., A.K. Irvine y N.G. Walsh. 1989. Vertebrate dispersal syndromes in some Australian and New Zealand plant communities, with geographic comparisons. *Biotropica* 21:133-147.

Recibido: 5 de mayo de 2012; Revisión aceptada: 20 de marzo de 2013.
Editor asociado: Leonardo Chapa Vargas.