

Aplicación de modelos de nicho ecológico como instrumento para predecir la distribución potencial de algunas especies de aves en las Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA's)

FPC de la Universidad Politécnica de Cataluña
Itzia Calixto Albarrán

1. Introducción

Los países que albergan una mayor parte de la biodiversidad, que coinciden en muchos casos con países de las denominadas economías emergentes, como es el caso de México, soportan a su vez una fuerte presión sobre su medio ambiente y sus recursos naturales. Así, buena parte de la diversidad biológica en mayor riesgo de extinción se localiza en los países megadiversos, que están atravesando cambios sociales, económicos, territoriales y ambientales rápidos y quizá drásticos, resultado de un desarrollo económico y regional no muy acorde con las necesidades de conservación de ecosistemas y especies, entre otras cosas. Por lo tanto, la conservación y la gestión de esta diversidad representan un ineludible compromiso de gran magnitud para las generaciones actuales y futuras, por eso determinar la distribución geográfica de una especie o de un grupo de especies es necesario para establecer prioridades de conservación.

Entre los factores que inciden en la distribución de especies, queremos resaltar, tres de aquellos en los que la acción humana tiene una señalada influencia sobre la biodiversidad y su distribución. Nos referimos al calentamiento global, los cambios de uso del suelo y las políticas de conservación desarrolladas en los últimos años, en concreto, en este último aspecto, al programa de Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) vigente desde 1997.

En lo que se refiere al cambio climático, estudios recientes ([Thuiller et al., 2005](#); [Peterson et al., 2001](#)) concuerdan en el hecho de que el incremento en el calentamiento global afecta a la biodiversidad y toca distintos aspectos de la historia natural y biogeografía de las especies a diferentes escalas y de diversas formas como son: a) variaciones en los rangos de especies y en la composición de las comunidades, b) desplazamientos altimétricos y/o latitudinales de comunidades vegetales o ecosistemas, y c) cambios en el funcionamiento de los ecosistemas. A nivel de especie podría ocurrir: desplazamiento, adaptación o extinción local como consecuencia de las anomalías climáticas ([Peterson et al., 2001](#)), pues es posible una mayor probabilidad de extinciones locales para las especies que tienen una distribución restringida (endémicas), mientras las especies con distribuciones amplias se verán probablemente menos afectadas ([Thuiller et al., 2005](#)). En este contexto, las especies de fauna y flora de México, hasta ahora amenazadas por la presión de las actividades humanas, también lo estarán por efecto del cambio climático, lo que implicará un cambio en la abundancia y en la distribución espacial de las especies más susceptibles ([Peterson et al., 2001](#); [Peterson et al., 2002a](#)).

La actividad económica del ser humano (explotación forestal, agricultura, urbanización, ganadería, construcción de infraestructura, minería, etc.) ha desencadenado procesos graves de degradación ambiental, ha provocado una pérdida generalizada de la biodiversidad mundial, y ha contribuido de manera significativa al cambio climático ([Meyer y Turner, 1992](#); [Houghton, 1994](#)). Entre los factores que están relacionados con la degradación del suelo, el cambio de su uso económico —el uso del suelo— es de los más graves, pues conlleva en muchos casos la remoción total o parcial de la vegetación de los terrenos forestales para destinarlos a actividades no forestales. Es por esto, que en este estudio se creyó importante conocer la distribución potencial actual y la pérdida del hábitat de algunas especies de aves de México causado por cambios de uso de suelo y las debidas al cambio climático.

En cuanto a conservación se refiere, la protección de los hábitats es la forma más común y, bajo ciertas circunstancias y condiciones, la más efectiva para preservar la diversidad biológica del planeta. El principal mecanismo de conservación en México lo constituyen las Áreas Naturales Protegidas (ANP's) ([INE-SEMARNAT, 2001](#)). Para el caso particular de las aves, México cuenta con un programa de Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA's, [Cipamex-Conabio, 1999](#); [Arizmendi y Márquez, 2000](#)). Este programa tiene como objetivo conservar los sitios donde anidan, se reproducen y alimentan numerosas especies de aves endémicas y migratorias de Canadá, los Estados Unidos de América y México. A la fecha México cuenta con un total de 230 AICA's, que contienen más de 26000 registros de 1038 especies de aves.

Finalmente, este capítulo introductorio no estaría completo sin presentar y hacer hincapié en el papel desarrollado por aquellas técnicas ligadas a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que a partir de la aplicación de ciertos modelos matemáticos permiten predecir la distribución de especies en lugares donde no se han realizado colectas, algo que puede resultar del mayor interés para guiar las políticas públicas de conservación del patrimonio natural del país.

Son el potencial de estos modelos y el interés de extender su aplicación al estudio de la megadiversidad biológica de México, lo que da sentido a esta investigación.

Por lo que se refiere al uso de los SIG en los estudios sobre la distribución actual de especies para intentar predecir hábitat potenciales, algunos autores han observado que estos sistemas pueden ser un instrumento útil para crear mapas de distribución y hábitat potencial, abundancia y riqueza de especies, así como para la fácil y rápida detección, evaluación y manejo de especies invasivas, y para determinar procesos como la dispersión, adaptación, competencia, sucesión, presiones provocadas por incendios y pastoreo, entre otras ([Peterson, 2001](#)). Los SIG proporcionan las herramientas que permiten medir fácilmente variables ambientales que están disponibles en formato digital para cualquier punto donde se ha examinado la distribución de una especie. Estas variables se pueden probar estadísticamente como predictores potenciales de la distribución de una especie dada. Con los resultados de los modelos estadísticos y con la ayuda de un SIG, se pueden generar mapas predictivos de la distribución de la especie, siempre y cuando se tengan mapas digitales de los predictores en el área de estudio ([Rico-Alcázar et al., 2001](#)). Así también, los modelos de nicho ecológico son creados en un SIG o pueden ser desplegados en ellos para dar una representación visual de la cobertura ambiental y el hábitat potencial o la abundancia ([Holcombe et al., 2007](#)).

2. Objetivos

En México, la información sobre algunas especies de aves es escasa y el estado actual de las poblaciones incierto. Es por ello, que en este trabajo se pretende modelar la distribución real conocida, potencial y futura de algunas especies de aves endémicas en México que habitan las Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICA's) utilizando el modelo GARP. La meta con estos análisis es proporcionar una visión completa de la distribución geográfica de algunas especies de aves y utilizar estos modelos para evaluar el nivel de protección que proporcionan las AICA's. En particular, se pretende implementar un Sistema de Información Geográfica para predecir la distribución potencial de algunas especies de aves y el impacto que ejercen el cambio climático y el cambio de uso de suelo en su distribución.

3. Métodos

En relativo al software, se probó utilizar los programas Geomedia, MapInfo y ArcMap. Sin embargo, este último fue el más accesible, ya que para el tipo de operaciones entre las diferentes capas que se utilizaron ofrecía mayor claridad y fácil manejo. Además, este programa se eligió porque cumple las condiciones de trabajar simultáneamente con estructuras de datos vectoriales y raster, permite operaciones avanzadas de álgebra de mapas y dispone de un lenguaje de desarrollo suficiente para la automatización de tareas. Asimismo, el ArcMap™ 9.2 de ESRI resulta un elemento valioso para la sistematización de información y ofrece una base de datos dinámica, en la que se puede trabajar interactivamente con distintas imágenes y con distintas capas de información vinculadas entre sí.

La selección de las especies de aves se basó, primero, en aquellas especies listadas como "amenazadas" (2 especies), las "sujetas a protección especial" (5 especies) y las que se catalogan "en peligro de extinción" (6 especies) por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 ([DOF, 2002](#)). En segundo lugar, se tomaron en cuenta las especies que estaban presentes en al menos 20 puntos de muestreo. Los datos de distribución de las especies de aves seleccionadas fueron tomados de las bases de datos de diferentes colecciones científicas y de una base de datos compilada por la CONABIO (www.conabio.gob.mx). Algunas de las fuentes de datos fueron obtenidas del Sistema Mundial de Información sobre Biodiversidad (GBIF) y el Sistema de Información Ornitológica (ORNIS).

Las capas ambientales fueron obtenidas de la base de datos de WorldClim (<http://www.worldclim.org>), la cual se explica en detalle en [Hijmans et al., 2006](#). Esta base contiene datos climáticos que corresponde a capas climáticas globales (grids de 20 X 20 km), con una resolución de 1 km, obtenidas de la interpolación de los registros de las estaciones climáticas de 1950-2000 procedentes de diversas fuentes a nivel global, regional, nacional y local. Las variables bioclimáticas son 19 derivadas de la temperatura media anual (temperatura media anual, rango medio diario, isoterma, estacionalidad de la temperatura, temperatura máxima del mes más caliente, temperatura mínima del mes más frío, rango anual de temperatura, temperatura promedio del cuarto más lluvioso, temperatura promedio del cuarto más seco, temperatura promedio del cuarto más cálido, temperatura promedio del cuarto más frío, precipitación anual, precipitación del mes más húmedo, precipitación del mes más seco, estacionalidad de la precipitación, precipitación del cuarto más lluvioso, precipitación del cuarto más seco, precipitación del cuarto más cálido, precipitación del cuarto más frío). Además de elevación, pendiente y aspecto.

Para evaluar la distribución de especies en un escenario de cambio climático, se utilizaron los mismos datos de topografía en las estimaciones de los parámetros bioclimáticos de los siguientes 20 y 50 años, se incluyeron 2 escenarios del Centro Canadiense Climático (http://www.ipcc-data.org/sres/gcm_data.html): CGCM2 SRESB2 (el conservador) y el CGCM2 SRES A2 (el menos conservador). El escenario A2, supone un incremento de las temperaturas para 2100 de 3.0 a 5.2 °C y en el escenario B2 el rango de incremento es de 2.1–3.9 °C ([IPCC, 2001](#)).

El nicho ecológico de las especies se modeló usando el software Desktop Garp en su versión 1.1.6. (<http://www.lifemapper.org/desktopgarp>). Este paquete se basa en el algoritmo genético GARP (Genetic Algorithm for Rule-Set Prediction, [Stockwell y Peters, 1999](#)) que utiliza información sobre las localidades de muestreo, con referencia geográfica (longitud y latitud), mapas de variables ambientales (generalmente obtenidos de datos de sensores remotos y modelos climáticos) y SIG. Este modelo busca correlaciones no aleatorias de las características ecológicas de las localidades de muestreo con localidades tomadas al azar de la región considerada, desarrollando una serie de reglas que reflejan los factores ambientales asociados con la presencia de la especie. Funciona iterativamente aplicando distintas reglas de modelado, generando y evaluando en cada bucle de cálculo un modelo de distribución binario distinto. Para evaluar si una regla es incorporada o no al modelo de nicho se utilizan los cambios (incremento) en la precisión de predicción de una iteración a otra, con base en 1000 iteraciones o hasta que la adición de nuevas reglas no pueda incrementar más la precisión predictiva del modelo. Finalmente, Desktop GARP da la opción de obtener los mejores modelos con base en ciertos umbrales de omisión y comisión. La omisión que será utilizada aquí es del 10% y de estos se seleccionaron la mitad de los modelos que estuvieron más próximos a la mediana en el eje de la comisión ([Anderson et al., 2003](#)).

En este caso, se generaron 100 modelos para cada especie y se seleccionaron los mejores que cubren las siguientes condiciones: (1) los 20 modelos en los que los errores de omisión (es decir, predecir ausencia de la especie, cuando en realidad está presente) fueran mínimos y, (2) de esos 20 modelos, se seleccionaron 10 modelos que estén más cercanos a la mediana del porcentaje del área predicha con respecto al total del área de estudio ([Anderson et al., 2002](#)), los cuales se sumaron mediante un proceso conocido como "álgebra de mapas", a través de una función que combina los valores de cada matriz raster, para obtener un mapa de consenso de distribución potencial actual de cada una de las especies analizadas. Es decir, el mapa final tiene valores de 0 a 10, en donde los valores de 0 son áreas en donde todos los modelos coinciden en que la especie está ausente, 10 significa que todos los modelos predicen la presencia de la especie, 5 indica que la mitad de los modelos predijeron la presencia de la especie en esas áreas. La predicción final se proyectó en un mapa digital (grid) y se interpreta como la distribución potencial de la especie. Para realizar la suma de los mapas de distribución potencial de cada una de las aves seleccionadas (álgebra de mapas) se utilizó la herramienta *Raster Calculator* de *Spatial Analyst*.

Otro análisis geográfico utilizado en este estudio fue la unión de capas superpuestas, la cual combina las características geográficas y las tablas de atributos de todas ellas en una nueva capa. Este tipo de análisis espacial se utilizó para asignar la presencia o ausencia de las especies y así obtener un mapa de distribución potencial más conservador de cada una de las especies. Primero, se unieron la capa de los puntos de muestreo y el grid de la distribución potencial que tiene valores de 0 a 10. En segundo lugar, se utilizó la herramienta *Get grid value* que arroja el valor del grid (0 a 10) que tiene cada punto de muestreo. En tercer lugar se contaron el número de puntos de muestreo que había para cada valor. Se consideró el rango de presencia (1) a partir del valor donde se tenía el 90% de los puntos de muestreo. Posteriormente, se realizó una reclasificación binaria del mapa de distribución potencial (valores de 0 a 10), para lo cual se utilizó la herramienta *Reclassify de Spatial Analyst*. El nuevo mapa que se generó tiene valores de 0 y 1, en donde los valores de 0 son áreas en donde la especie está ausente y 1 significa la presencia de la especie en esas áreas.

Con el fin de analizar los cambios en la distribución de las especies por la influencia del **cambio climático** se modeló el nicho ecológico bajo dos escenarios climáticos simulados y para dos periodos de tiempo (2020 y 2050) para estimar sus distribuciones potenciales futuras. Con el GARP se seleccionaron los mejores 10 modelos para cada especie para cada escenario climático (2020 y 2050). Aquí se utilizó nuevamente el análisis espacial de datos raster y se sumaron estos modelos utilizando la herramienta *Raster Calculator* de *Spatial Analyst* para obtener un mapa final que indica el consenso de los modelos y por lo tanto, la distribución potencial futura de cada una de las especies analizadas para el año 2020 y 2050. El mapa final de cada escenario climático tiene valores de 0 a 10. Se utilizó la unión de capas superpuestas para asignar la presencia o ausencia de las especies y así obtener un mapa de distribución potencial más conservador de cada una de las especies para cada escenario climático. Por lo tanto, se emplearon los mismos métodos que para la distribución potencial actual de las especies. El mapa que se generó para el 2020 y 2050 tiene valores de 0, 10 y 100, en donde 10 y 100 son áreas en donde la especie está presente. Para la reclasificación se utilizó el mismo valor de corte que para los mapas de distribución potencial correspondiente para cada especie.

Para conocer el cambio en la distribución geográfica de las especies seleccionadas debidas al cambio climático, se utilizó nuevamente el análisis espacial de datos raster a partir de la superposición de conjunto de datos mediante el “álgebra de mapas”. Se sumaron los tres mapas (grids) de distribución potencial (actual, 2020 y 2050) con la herramienta *Raster Calculator* de *Spatial Analyst*. El mapa final que se generó tiene valores de 0, 1, 10, 11, 100, 101, 110 y 111, en donde los valores de 0 son áreas en donde la especie está ausente y el resto significan la presencia de la especie en esas áreas para la actualidad (2000). El valor 10 se relaciona con la presencia de la especie en el 2020 y el valor 100 para el año 2050. El valor 11 significa que la especie se conservó en el 2020 y el valor 101 en el año 2050. El valor 110 corresponde a la presencia de la especie en el 2020 y se conserva en el 2050, mientras que el valor 111 significa que esta presente en la actualidad y se conserva en el 2020 y en el 2050. Estos valores permitieron calcular la sensibilidad de cada especie al cambio climático, ya que se contrastaron los nichos climáticos presentes con los futuros y se calculó el número de píxeles (área en km²) que siguen siendo adecuados para cada especie en relación al número total de píxeles definidos como hábitat en el modelo de nicho actual. El cambio de distribución geográfica de las especies fue calculado como la diferencia entre la pérdida de nicho y la ganancia. Esta estimación representa el porcentaje de expansión o contracción del rango geográfico en relación al nicho climático actual de cada especie bajo cada escenario y para cada punto en el tiempo.

Para analizar los cambios en la distribución de las especies debidas al **cambio de uso de suelo** se realizó una sobreposición geográfica de cada escenario climático y para cada especie con la cobertura de los tipos de vegetación de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal ([SEMARNAP-INEGI-UNAM, 2001](#)). Se eliminaron aquellas áreas que correspondían a zonas perturbadas (asentamientos humanos, pastizal inducido y cultivado, área sin vegetación aparente, plantación forestal y agricultura de humedad, temporal y riego). Para lo cual, primero se convirtió el mapa de distribución potencial de las especies (raster) en una capa de polígonos (vectorial) con la herramienta *Conversion tools /From Raster/Raster to polygon*, después se eliminaron aquellos registros que se relacionan con la ausencia de la especie y sólo se quedaron los registros de presencia de especies. El segundo paso fue unir espacialmente (análisis espacial) la tabla de la capa del Inventario Forestal con la tabla de la capa de distribución potencial de las especies transformada a polígonos, esta operación se realizó con la herramienta *Overlay/Spatial Join* de *Analysis Tools*. Ello permite asignar a la capa de distribución potencial los datos de la comunidad vegetal a la que pertenecen y calcular las áreas de distribución de cada especie para los dos escenarios (actual y considerando el cambio climático para 2020 y 2050) por comunidad vegetal. Estos valores permitieron calcular la sensibilidad de cada especie al cambio de uso de suelo, ya que se contrastaron los nichos presentes con los futuros y se calculó el número de píxeles (área en km²) que permanecen por comunidad vegetal para cada especie en relación al número total de píxeles definidos como hábitat en el modelo de nicho actual.

Para analizar evaluar el nivel de protección que ofrecen las **Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICA's)** en las zonas donde se distribuyen las aves seleccionadas durante los periodos de tiempo a analizar (2000, 2020 y 2050), se realizó una sobreposición geográfica de cada escenario climático y para cada especie con la cobertura de las AICA's. Para lo cual, se convirtió el mapa de distribución potencial de las especies (raster) en una capa de polígonos (vectorial) con la herramienta *Conversion tools /From Raster/Raster to polygon*, después se eliminaron aquellos registros que se relacionan con la ausencia de la especie y sólo se quedaron los registros de presencia de especies (valores 1, 10 o 100). El segundo paso fue sobreponer la cobertura de las AICA's sobre los mapas de distribución potencial generados con un tipo de análisis espacial, denominado análisis de recubrimiento a través de la herramienta *Clip* que se utiliza cuando se quiere recortar una porción de una capa usando uno o más polígonos de otra capa. En este sentido, la herramienta *Clip/Extract* de *Analyst Tools*, se utilizó para obtener sólo aquellas AICA's que se localizan dentro del área de distribución de cada una de las especies seleccionadas. Estos valores permitieron calcular el cambio en el área considerada importante para cada especie, ya que se contrastaron los nichos presentes con los futuros y se calculó el área en km² que se encuentra dentro de cada AICA.

Asimismo, se procedió a evaluar el nivel de representatividad (proporción de la distribución de cada especie que se encuentra dentro de ellas) que estas áreas proveen a cada una de las especies modeladas y así identificar omisiones en la conservación. En primer lugar, se cuantificó y categorizó el área y proporción de la zona de estudio que ocupa cada una de las especies cuyas distribuciones fueron modeladas. La categorización presentada en las tablas 1, 2 y 3, se realizó conforme a lo sugerido por el Manual de análisis de omisiones de conservación ([Scott et al, 1993](#)) y tomando en cuenta información contenida en la Norma Oficial Mexicana NOMECON- 059-SEMARNAT-2001-Protección ambiental lista de especies en riesgo.

Tabla 1. Categorización de la distribución de especies.

Nivel de distribución	% distribución en el área	Símbolo
Restringida	<10	a
Baja	11 a 20	b
Intermedia	21 a 50	c

Tabla 2. Categorización del nivel de representatividad por AICA's.

Nivel de representatividad	% distribución por AICA	Símbolo
Mínimo	<10	a
Razonable	11 a 20	b
Mediano	21 a 50	c

Amplia	>50	d	Alto	>50	d
--------	-----	---	------	-----	---

Tabla 3. Nivel de vulnerabilidad.

Nivel de distribución	Nivel de representatividad por AICA's	Nivel de vulnerabilidad	Nivel de distribución	Nivel de representatividad por AICA's	Nivel de vulnerabilidad
a	a	1	c	a	2
	b	1		b	2
	c	2		c	3
	d	2		d	4
b	a	1	d	a	2
	b	1		b	2
	c	2		c	4
	d	2		d	4

4. Resultados

De las 94 especies que están reportadas como endémicas y son residentes de alguna AICA, únicamente para 13 fue posible generar modelos de distribución potencial, debido a que para las restantes 81 no se cumplió con los criterios de selección. Las 13 especies seleccionadas fueron: *Aimophila sumichrasti*, *Campylopterus excellens*, *Doricha eliza*, *Thalurania ridgwayi*, *Campylorhynchus chiapensis*, *C. yucatanicus*, *Cyanocorax beecheii*, *Geothlypis beldingi*, *G. speciosa*, *Glaucidium sanchezi*, *Passerina rositae*, *Picoides stricklandi* y *Xenotriccus mexicanus*.

Para las 13 especies seleccionadas se dispusieron de un total de 471 puntos de ocurrencia, de las cuales 6 especies se catalogan “en peligro de extinción”, 5 están “sujetas a protección especial” y 2 están listadas como “amenazadas” por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 (DOF, 2002). Se realizaron mapas de la distribución geográfica potencial actual de cada especie utilizando el algoritmo GARP.

Cambio climático

Los resultados muestran que las especies que se verán más afectadas por el cambio climático global en el periodo 2000-2020 serán *C. yucatanicus* que pierde un 67.3% del área de distribución (Mapa 1) y *G. sanchezi* con pérdida de casi la mitad de su área de distribución (45.5%, Tabla 4). En el periodo 2000-2050, la especie que pierde prácticamente toda su área de distribución (99.9%) es *C. yucatanicus*. El colibrí cola hendida (*D. eliza*) y la matraca chiapaneca (*C. chiapensis*) también pierden una buena porción de su área de distribución, 91.6% y 88.9%, respectivamente. Por otro lado, *A. sumichrasti* y *P. rositae* fueron las especies que ganaron más área, 41.5% y 40.9%, respectivamente para el periodo 2000-2020. Mientras que *C. yucatanicus* y *C. chiapensis* lo hicieron para el periodo 2020-2050 con 99.5% y 75.1%, respectivamente.

Tabla 4. Área de distribución histórica y potencial en el año 2020 de las especies de aves seleccionadas. Los valores negativos se refieren a que ganaron más área de la que perdieron. Las unidades son km²

Especie	Distribución histórica	2020			2050		
		Distribución potencial	Área perdida (%)	Balance área perdida - área ganada (%)	Distribución potencial	Área perdida (%)	Balance área perdida - área ganada (%)
<i>Aimophila sumichrasti</i>	9027	12616	158 (1.75)	-3589 (-39.76)	5210	5018 (55.59)	3817 (42.28)
<i>Campylopterus excellens</i>	253824	229631	33129 (13.05)	24193 (9.53)	88287	169273 (66.69)	165537 (65.22)
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	7443	6553	1811 (24.33)	890 (11.96)	3305	6620 (88.94)	4138 (55.60)
<i>Campylorhynchus yucatanicus</i>	28448	15726	19130 (67.25)	12722 (44.72)	216	28447 (99.99)	28232 (99.24)
<i>Cyanocorax beecheii</i>	211239	189685	45271 (21.43)	21554 (10.20)	149061	91367 (43.25)	62178 (29.43)
<i>Doricha eliza</i>	106943	112014	22544 (21.08)	-5071 (-4.74)	10507	97966 (91.61)	96436 (90.18)
<i>Geothlypis beldingi</i>	25823	23857	6075 (23.53)	1966 (7.61)	17882	13947 (54.01)	7941 (30.75)
<i>Geothlypis speciosa</i>	28989	22377	10181 (35.12)	6612 (22.81)	14965	16405 (56.59)	14024 (48.38)
<i>Glaucidium sanchezi</i>	15758	11385	7169 (45.49)	4373 (22.75)	12071	7861 (49.89)	3687 (23.40)
<i>Passerina rositae</i>	15039	17845	3352 (22.29)	-2806 (-18.66)	9717	8192 (54.47)	5322 (35.39)
<i>Picoides stricklandi</i>	85288	96603	14823 (17.38)	-11315 (-13.27)	52951	34279 (40.19)	32337 (37.92)
<i>Thalurania ridgwayi</i>	38341	29082	13942 (36.36)	9259 (24.15)	30279	12809 (33.41)	8062 (21.03)
<i>Xenotriccus mexicanus</i>	26451	21906	10435 (39.45)	4545 (17.18)	16668	13689 (51.75)	9783 (36.99)

Cambio de uso de suelo

El área de distribución potencial estimada de las 13 especies de aves disminuyó, en algunos ligeramente y en otros drásticamente, cuando se removieron las áreas que han sido transformadas (asentamientos humanos, área sin vegetación aparente, pastizal inducido y cultivado, plantación forestal y agricultura de humedad, temporal y riego). Los

resultados muestran que las especies que están más afectadas por el cambio de uso de suelo son: *C. chiapensis*, *P. rositae* y *G. speciosa* (Tabla 5). La distribución potencial de *C. chiapensis* se estima en 7443 km², sin embargo debido al cambio del uso de suelo, su área se ve disminuida en un 81.97% (1356.74 km²) (Mapa 2). *P. rositae* pierde un 78.74% (3196.84 km²) de su área de distribución que se estima en 15039 km². Se calcula que *G. speciosa* tiene un área de distribución de 28989 km² y debido al cambio del uso del suelo se ve reducida en un 72.56% (7954.46 km²).

A pesar de que no se tienen datos del cambio de uso de suelo para los años 2020 y 2050, se utilizó el Inventario Nacional Forestal del 2000 para calcular el cambio en la distribución de las especies de aves seleccionadas a pesar de que el uso fue estático, ya que la principal amenaza de los recursos forestales en México es la deforestación ocasionada por el cambio de uso del suelo. Los resultados muestran que en 2020 la distribución potencial de *C. chiapensis* se estima en 7443 km², sin embargo debido al cambio del uso de suelo, su área se reduce a 1138.21 km², lo que equivale a un reducción del 84.71%. *P. rositae* pierde un 87.96% que equivale a 1810.34 km². En el año 2050 el cambio de uso de suelo impacta más sobre el área de distribución de *C. yucatanicus* y *D. eliza*. El primero disminuye su área de distribución al 99.995% debido al cambio de uso de suelo y el segundo presenta un área de distribución de 106943 km² pero se reduce en un 94.45% (5935.28 km²).

Tabla 5. Distribución potencial actual y pérdida del hábitat causado por conversión antropogénica del hábitat.

Especie	Distribución histórica km ²	Distribución con respecto al INF km ²	% del área pérdida con respecto a la distribución histórica	% del área perdida
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	7443	1342.19	18.03	81.97
<i>Passerina rositae</i>	15039	3196.84	21.26	78.74
<i>Geothlypis speciosa</i>	28989	7954.46	27.44	72.56
<i>Doricha eliza</i>	106943	33472.44	31.30	68.70
<i>Xenotriccus mexicanus</i>	26451	9934.12	37.56	62.44
<i>Aimophila sumichrasti</i>	9027	3820.60	42.32	57.68
<i>Picoides stricklandi</i>	85288	36697.91	43.03	56.97
<i>Glaucidium sanchezi</i>	15758	8454.16	53.65	46.35
<i>Campylopterus excellens</i>	253824	137948.81	54.35	45.65
<i>Thalurania ridgwayi</i>	38341	24176.30	63.06	36.94
<i>Cyanocorax beecheii</i>	211239	138045.46	65.35	34.65
<i>Campylorhynchus yucatanicus</i>	28448	20108.46	70.68	29.32
<i>Geothlypis beldingi</i>	25823	23987.95	92.89	7.11

Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (AICA's)

En primer lugar, se cuantificó y categorizó el área y proporción de la extensión territorial de México (1 964 375 km²) que ocupa cada una de las especies cuyas distribuciones fueron modeladas. El 84.62% (11) de las especies modeladas (13) tienen una distribución restringida y el 15.38% (2) presentan una distribución baja. No hay ninguna especie que tenga distribución intermedia ni amplia (Tabla 6).

Tabla 6. Áreas de distribución de las aves modeladas en México.

Especie	Área total de distribución (km ²)	Porcentaje de distribución (%)	Nivel de distribución
<i>Doricha eliza</i>	106943	0.46	a
<i>Campylopterus excellens</i>	253824	12.96	b
<i>Campylorhynchus yucatanicus</i>	28448	0.38	a
<i>Glaucidium sanchezi</i>	15758	1.45	a
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	7443	10.78	b
<i>Geothlypis speciosa</i>	28989	5.46	a
<i>Xenotriccus mexicanus</i>	26451	1.32	a
<i>Picoides stricklandi</i>	85288	1.48	a
<i>Thalurania ridgwayi</i>	38341	0.80	a
<i>Cyanocorax beecheii</i>	211239	0.77	a
<i>Aimophila sumichrasti</i>	9027	4.35	a
<i>Passerina rositae</i>	15039	1.96	a
<i>Geothlypis beldingi</i>	25823	1.35	a

En cuanto al nivel de protección que proporcionan las AICA's se encontró que el 30.77% de las especies modeladas tienen un nivel de protección mínimo, el 38.46% de las especies lo tienen razonable, el 30.77% de las especies tienen protección mediana y ninguna especie recibe una protección alta. Cuatro especies modeladas tienen por lo menos el 20% de su área de distribución señalada como AICA, lo cual refleja la diversidad del país pero también transluce la

necesidad de incrementar las áreas de protección. La especie con mayor área considerada como AICA es *D. eliza* (Mapa 3), donde el 33.95% de su distribución (36307.74 km²) es señalada en esta categoría (Tabla 7).

Tabla 7. Niveles de representatividad de las áreas de distribución de las aves en las AICA's

Especie	Área total de distribución en AICA's (km ²)	Distribución en AICA's (%)	Nivel de representatividad
<i>Doricha eliza</i>	36307.74	33.95	c
<i>Campylopterus excellens</i>	75173.04	29.62	c
<i>Campylorhynchus yucatanicus</i>	8272.87	29.08	c
<i>Glaucidium sanchezi</i>	3846.91	24.41	c
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	1461.04	19.63	b
<i>Geothlypis speciosa</i>	4774.49	16.47	b
<i>Xenotriccus mexicanus</i>	4031.81	15.24	b
<i>Picoides stricklandi</i>	11474.33	13.45	b
<i>Thalurania ridgwayi</i>	4130.18	10.77	b
<i>Cyanocorax beecheii</i>	17893.51	8.47	a
<i>Aimophila sumichrasti</i>	361.72	4.01	a
<i>Passerina rositae</i>	550.45	3.66	a
<i>Geothlypis beldingi</i>	534.38	2.07	a

El nivel de vulnerabilidad resultante de la combinación del nivel de distribución y la protección proporcionada por AICA's, mostró que el 69.23% (9) de las especies modeladas (13) tienen un índice de vulnerabilidad 1 (el más alto) y el 30.77% (4) de las especies tiene un nivel de vulnerabilidad 2 (alta) (Tabla 8).

Tabla 8. Niveles de distribución protección y vulnerabilidad de las aves en la zona de estudio.

Especie	Nivel de distribución	Nivel de representatividad AICA's	Nivel de vulnerabilidad
<i>Doricha eliza</i>	a	c	2
<i>Campylopterus excellens</i>	b	c	2
<i>Campylorhynchus yucatanicus</i>	a	c	2
<i>Glaucidium sanchezi</i>	a	c	2
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	b	b	1
<i>Geothlypis speciosa</i>	a	b	1
<i>Xenotriccus mexicanus</i>	a	b	1
<i>Picoides stricklandi</i>	a	b	1
<i>Thalurania ridgwayi</i>	a	b	1
<i>Cyanocorax beecheii</i>	a	a	1
<i>Aimophila sumichrasti</i>	a	a	1
<i>Passerina rositae</i>	a	a	1
<i>Geothlypis beldingi</i>	a	a	1

En el 2020, sólo dos especies modeladas tienen por lo menos el 20% de su área de distribución señalada como un área de importancia para la conservación de aves (AICA), lo cual refleja la necesidad de incrementar las áreas de protección. La especie con mayor área considerada como AICA es *D. eliza*, donde el 32.84% de su distribución (35120.78 km²) es señalada en esta categoría. El 29.21% (74154.38 km²) de la distribución de *C. excellens* esta catalogada como AICA. Cabe resaltar que 5 especies modeladas tienen menos del 10% de su distribución considerada como AICA. En el año 2050, ninguna de las especies modeladas alcanza a tener el 20% de su área de distribución señalada como un AICA.

5. Discusión y Conclusiones

Uno de los objetivos de esta tesina era aplicar los conocimientos aprendidos a lo largo del Máster en Sistemas de Información Geográfica impartido en 2007- 2008 en la FPC de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Queda claro que los SIG no son sólo un software, sino que entre los cinco componentes que comúnmente se citan, hay dos que son esenciales. Un SIG se monta dentro de una organización, y este mero hecho conlleva a que éste se base en un buen diseño y en reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización. Las decisiones que van a caracterizar el SIG que se va a desarrollar aquí, afectan al tipo de datos que se van a usar en cuanto a su calidad, y junto con ello las diversas capas de información que se van a considerar para la solución de un caso determinado, como lo es conocer la distribución potencial de algunas especies de aves endémicas para México.

El SIG desarrollado aquí ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad, ya que nos permitió realizar un gran número de operaciones, sobresaliendo las superposiciones de mapas, transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos. Nos permitió hacer consultas rápidas a las bases de datos, tanto espacial como alfanumérica.

Se pudieron realizar pruebas analíticas rápidas y repetir modelos conceptuales en despliegue espacial. Se logró comparar eficazmente los datos espaciales a través del tiempo (análisis temporal). Efectuamos algunos análisis, de forma rápida que hechos manualmente resultarían largos y molestos. Se podrá también integrar en el futuro, otro tipo de información complementaria que se considere relevante y que este relacionada con la base de datos originada aquí. Finalmente, este SIG permitirá apoyar el proceso de la toma de decisiones, en cuanto a conservación se refiere.

En relativo al software, se realizaron pruebas utilizando los programas Geomedia, MapInfo y ArcMap. Sin embargo, este último resulto ser el más accesible ya que para el tipo de operaciones entre las diferentes capas que se utilizaron ofrecía mayor claridad y fácil manejo. El programa permite mediante la tecnología de los SIG's, el análisis cartográfico de superposición de variables, cumple las condiciones de trabajar simultáneamente con estructuras de datos vectoriales y raster, permite operaciones avanzadas de álgebra de mapas y dispone de un lenguaje de desarrollo suficiente para la automatización de tareas.

En lo referente a la aplicación de los SIG a los estudios dirigidos a la conservación de la biodiversidad, y en particular los resultados de la aplicación del modelo GARP a la distribución de especies de aves en México, podemos comentar que se ha venido explorando la razón de por qué existen especies con distribución restringida y por qué las hay de distribución amplia, y por qué algunas son raras y otras abundantes. Diferentes son los factores (abióticos y bióticos) que pueden influir en la distribución y abundancia de las poblaciones de las especies a lo largo de su rango geográfico, así como diferentes son también las hipótesis y teorías que tratan de explicar este fenómeno. Una de estas teorías es la del nicho ecológico.

Sobre el GARP, ha demostrado ser un modelo útil para conocer la distribución potencial de las especies, a pesar de ser una caja negra, que nos impide conocer cómo opera el programa en comparación con otros algoritmos. Sin embargo, se trató de superar las desventajas del GARP disminuyendo los errores de omisión y comisión. De los 100 modelos generados para cada especie, se seleccionaron 20 que tuvieran un error de omisión menor al 10% y de éstos se seleccionó la mitad de los modelos que estuvieron más próximos a la mediana en el eje de la comisión ([Anderson et al., 2003](#)).

Los resultados alcanzados indican que es posible generar mapas de predicción de distribución potencial de especies a partir de registros de presencia en combinación con mapas digitales que representan variables ambientales. El principio es la descripción de las relaciones presentes entre la distribución geográfica de las especies y las múltiples variables ambientales ([Peterson et al., 2005](#)), las cuales generan representaciones formales del espacio ecológico (nicho) sobre el espacio geográfico (distribución, [Liras 2008](#)). Además pueden llegar a tener un potencial enorme para la ciencia teórica y aplicada en áreas como la ecología de comunidades (abundancia vs. riqueza de especies, competencia, etc.), la ecología de poblaciones (extinción, colonización y dinámica de diversificación), la biología de la conservación (identificación de áreas críticas para algunas especies), el control biológico y la ecología de la restauración (especies invasoras, cambio climático, etc.) ([Ferrier, 2002](#); [McNyset, 2005](#); [Guisan et al., 2006](#); [Graham et al., 2004, 2006](#); [Lawler et al., 2006](#); [Anderson y Martínez-Meyer, 2004](#); [Peterson, 2000, 2002, 2003a, 2003b](#); [Ward, 2007](#); [Navarro et al., 2003](#)).

La distribución potencial de las especies mediante el modelado con GARP es consistente con los reportes de su distribución histórica. De las 13 especies endémicas seleccionadas aquí, 6 se catalogan "en peligro de extinción", 5 están "sujetas a protección especial" y 2 están como "amenazadas" por la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001 ([DOF, 2002](#)). Por lo tanto, su conservación dependerá críticamente de unas pocas y reducidas áreas protegidas.

El modelado de nicho ecológico ha demostrado ser una herramienta útil para predecir la distribución potencial de las especies en el contexto del cambio climático global. En este estudio se utilizó el algoritmo GARP para modelar la distribución de trece especies de aves. Igualmente, se proyectó su distribución potencial bajo escenarios de cambio climático que se espera que ocurran en 2020 y en 2050, basándose en una prospectiva de cambio global conservador.

En general, los resultados indican que para el 2020 el 7.7% de las aves estudiadas (1) perderán más del 50% del área de su distribución actual, 4 especies perderán del 30 al 50% del área y 8 especies perderán menos del 30% del área. En el 2050 el 69% de las aves estudiadas (9) perderán el 50% o más del área de su distribución actual y 4 especies perderán de 30 a 50% del área. El escenario más dramático es para la matraca yucateca (*Campylorhynchus yucatanicus*) que pierde un 67.3% y 99.9% del área de distribución para el año 2020 y 2050, respectivamente. Si se considera la deforestación (tal como ocurre en el presente), la proyección sería aún más desoladora, ya que perdería el 29.32% de su distribución potencial actual, en el 2020 perdería el 72.2% y en el 2050 prácticamente desaparecería (99.99%). En lo que se refiere al balance de área perdida menos el área ganada durante el periodo 2020-2050, la matraca yucateca también es la que en proporción pierde más área de la que gana (44.7%). Es importante señalar que esta especie se identifica en la situación más crítica, debido a que los modelos de cambio climático aplicados predicen que el nicho de la especie desaparecerá para 2050. Los resultados

conducen a aquellos obtenidos en especies con una capacidad de dispersión limitada dado que éstas no responden a los cambios climáticos desplazándose a zonas más favorables, sino que enfrentan una pérdida de su área de distribución (Parra *et al.*, 2005). La supervivencia de esta especie está en riesgo, aunque el área de distribución potencial está comprendida dentro de un número considerable de AICA, sin embargo no necesariamente corresponde a un Área Natural Protegida (ANP).

Los resultados presentados sobre el cambio del uso del suelo muestran tendencias muy desalentadoras. El área de distribución potencial estimada de las trece especies de aves disminuyó. El 54% de las especies estudiadas perderán más del 50% del área de su distribución actual. Las especies que están más afectadas por el cambio de uso de suelo son *Campylorhynchus chiapensis* y *Passerina rositae*, ya que su área de distribución potencial se ve disminuida en un 81.97% y 78.74%, respectivamente. Si además consideramos la pérdida del área en el tiempo, los resultados muestran que en 2020 las especies que están más afectadas por el cambio de uso de suelo y cambio climático siguen siendo *P. rositae* y *C. chiapensis*. Esta última reduce su área de distribución en un 84.71%, mientras que *P. rositae* lo hace en un 87.96%. En el año 2050 el cambio climático y de uso de suelo impactan de manera importante sobre el área de distribución de *C. yucatanicus*, *Doricha eliza* y *P. rositae*. Estas cuatro especies disminuyen su área de distribución en más de 85%. La situación más crítica la presenta *C. yucatanicus*, ya que los modelos aplicados predicen que el nicho de la especie desaparecerá para el 2050. *D. eliza* disminuye su área de distribución en un 94.45%, *P. rositae* lo hace en un 92.14%.

Hasta la fecha no se había realizado un análisis sobre la contribución real en materia de conservación que proporcionan las AICA's. Los resultados obtenidos sugieren que estos instrumentos de conservación no representan adecuadamente a la avifauna estudiada, ya que el 69.23% (9) de estas especies según el análisis de omisiones de conservación pertenecen a la categoría de mayor vulnerabilidad y cuentan con una baja representatividad dentro de las AICA's, donde sólo el 30.77% de las especies modeladas tienen un nivel de protección mínimo. El 38.46% de las especies tienen un nivel de protección razonable; el 30.77% de las especies tienen un nivel de protección mediano, y ninguna especie recibe una protección alta. Por otro lado, sólo cuatro especies modeladas tienen por lo menos el 20% de su área de distribución señalada como de importancia para la conservación de aves (AICA), lo cual refleja la diversidad del país pero también trasluce la necesidad de incrementar sus áreas de protección. La especie con mayor área considerada como AICA es *D. eliza*, donde el 33.95% de su distribución es señalada en esta categoría; el 29.62% de la distribución de *C. excellens* está catalogada como AICA; *C. yucatanicus* tiene el 29.08% y *G. sanchezi* el 24.41%. Cabe resaltar que 4 especies modeladas tienen menos del 10% de su distribución considerada como AICA. De hecho, *G. beldingi* tiene únicamente el 2.07% de su distribución como AICA.

Posiblemente el uso de criterios poco fundamentados en el momento de identificar las zonas de importancia para la conservación de aves haya generado estas limitaciones. El hecho de que una parte importante de la información sea a nivel de país obliga a que en un futuro próximo se deban realizar estudios a escalas de mayor detalle, por ejemplo estatal, eco-regionales e incluso municipales, que puedan incidir en los planes de ordenamiento ecológico desarrollados en ambos niveles de la administración, a fin de que las corporaciones locales y estatales se apliquen en la conservación de ecosistemas y especies ubicadas dentro de la NOM-ECOL-059, por lo tanto en la toma de decisiones a esos niveles.

Surge también la necesidad de ampliar estudio con otras especies de aves, utilizar otras capas como barreras biogeográficas, como dice Martínez-Meyer (2005), para tener mayor detalle de la distribución potencial de las especies de aves para conseguir desarrollar mapas menos sobreestimados, así como las capas de áreas naturales protegidas (ANP's) con la finalidad de evaluar los niveles de protección que brindan actualmente estas áreas. Asimismo, es necesario identificar un sistema de áreas prioritarias que incremente sustancialmente el nivel de protección a la avifauna nacional. Debido a que el presente estudio se basó únicamente en información avifaunística, es importante llevar a cabo investigaciones adicionales para asegurar que otros grupos taxonómicos no estén poco representados. Además es importante que una vez que se logren identificar sitios prioritarios, se apliquen acciones para la conservación en estos sitios.

6. Bibliografía

- Anderson R. P., A. T. Peterson y M. Gómez-Laverde. 2002. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos* **98**:3–16.
- Anderson R. P., D. Lew y A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling* **162**: 211-232.
- Anderson R. P. y E. Martínez-Meyer 2004. Modeling species Geographic distributions for preliminary conservation assessments: an implementation with the spiny pocket mice (Heteromys) of Ecuador. *Biological Conservation* **116**:167-179.
- Arizmendi M. C. y L. Márquez. 2000. *Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves en México (AICA's)*. Cipamex-Conabio-CCA-FMCN, México DF. 440 pp.

- Cipamex-Conabio. 1999. *Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves. Escala 1:250 000*. Consejo Internacional para la Preservación de las Aves-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF, México.
- Diario Oficial de la Federación. 2002. *Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT-2001*. 6 de marzo de 2002 México D.F
- Ferrier S. 2002. Mapping spatial pattern in biodiversity for regional conservation planning: where to from here?" *Systematic Biology* **51**: 331-363.
- Graham C. H., S. R. Ron, J. C. Santos, C. J. Schneider y C. Moritz. 2004. Integrating phylogenetics and environmental Niche models to explore speciation mechanisms in dendrobatid frogs. *Evolution* **58**:1781-1793.
- Graham C. H., C. Moritz y S. E. Williams. 2006. *Habitat history improves prediction of biodiversity in a rainforest fauna*. Proceedings of the Natural Academy of Science of USA 103: 632-636.
- Guisan A., O. Broennimann, R. Engler, M. Vust, N. G. Yoccoz, A. Lehmann y N. E. Zimmermann. 2006. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology* **20**: 501-511.
- Hijmans R. J., S. Cameron, J. Parra, P. Jones, A. Jarvis y K. Richardson. 2006. *World-Clim version 1.4*. Museum of Vertebrate Zoology of the University of California, CIAT, and Rainforest CRC. <http://www.worldclim.org/>.
- Holcombe T., T. J. Stohlgren y C. Jarnevich. 2007. Invasive species management and research using GIS. En: Witmer, G. W., W. C. Pitt y K. A. Fagerstone (eds.). *Managing Vertebrate Invasive Species: Proceedings of an International Symposium*. National Wildlife Research Center, Fort Collins, CO. 108-114 p.p.
- Houghton R. A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *BioScience* **44**:305-313.
- INE-SEMARNAT. 2001. *Mapa de Áreas Naturales Protegidas*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. www.semarnat.gob.mx
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lawler J. J., D. White, R. P. Neilson y A. R. Blaustein. 2006. Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. *Global Change Biology* **12**: 1568-1584.
- Liras E. 2008. Replica del IV Taller de modelización de nichos ecológicos. 27 al 20 de mayo de 2008. Madrid, España.
- Martínez-Meyer E. 2005. Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics* **2**:42-55.
- McNyset K. M. 2005. Use ecological niche modeling to predict distributions of freshwater fish species in Kansas. *Ecology of Freshwater Fish* **14**: 243-255.
- Meyer W. B. y B. L. Turner. 1992. Human population growth and global land-use/cover change. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **23**:39-61.
- Navarro A. G., A. T. Peterson, E. J. Nakazawa y I. Liebig-Fossas. 2003. Colecciones biológicas, modelaje de nichos ecológicos y los estudios de la biodiversidad. En: Morrone J. J. y J. Llorente (Eds.). *Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía*. UNAM-CONABIO. México. 115-122 p.p.
- Parra G., E. Martínez-Meyer y G. Pérez-Ponce de León. 2005: Forecasting climate change effects on salamander distribution in the highlands of central Mexico. *Biotropica* **37**(2):202- 208.
- Peterson A. T., S. L. Egbert, V. Sánchez-Cordero y K. P. Price. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic birds and mammals in Veracruz, México. *Biol. Conserv.* **93**: 85-94.
- Peterson A. T. 2001. Predicting species geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor* 103: 599-605.
- Peterson A. T., V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R. Buddemeier y A. Sánchez- Navarro. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modeling* **144**: 21-30.
- Peterson A. T., L. G. Ball y K. P. 2002. Predicting distributions of Mexican birds using ecological niche modelling methods. *Ibis* **144**: 27-32.
- Peterson A. T., M. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. Buddemeier y D. Stockwell. 2002a. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* **416**: 626-628.
- Peterson A. T. 2003a. Projected climate change effects on Rocky Mountain and Great Plains birds: generalities of biodiversity consequences. *Global Change Biology* **9**: 647-655.

- Peterson A. T. 2003b. Predicting the geography of species invasions via ecological Niche modelling. *Quarterly Review of Biology* 787: 419-432.
- Peterson A. T., H. Tian, E. Martínez-Meyer, J. Soberón, V. Sánchez-Cordero, V. y B. Huntley. 2005. Modeling distributional shifts of individual species and biomes. En: T. E. Lovejoy y L. Hannah (eds.). *Climate change and biodiversity*. Yale University Press, New Haven, CT. 211–228 p.p.
- Rico-Alcázar L., J. A. Martínez, S. Morán, J. R. Navarro y D. Rico. 2001. Preferencias de hábitat del Águila azor Perdicera (*Hieraaetus fasciatus*) en Alicante (E de España) a dos escalas espaciales. *Ardeola* 48: 55–62.
- Scott J. M., F. Davis, B. Scuti, R. Noss, B. Butterfield, C. Groves, H. Anderson, S. Caicco, F. D'Erchia, Jr. T. C. Edwards, J. Ulliman, R. Wright. 1993. Gap Analysis: A geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlife Monogr.* 123, 1-41.
- SEMARNAP-INEGI-UNAM (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Geografía. 2001. *Inventario Nacional Forestal. Escala 1:250,000*. México: SEMARNAP-INEGI-UNAM.
- Stockwell D. R. B. y D. Peters. 1999. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13:143-158.
- Téllez-Valdés O. y P. Dávila-Aranda. 2003. Protected areas and climate change: A case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Cons. Biol.* 17: 846-853.
- Thuiller W., S. Lavorel, M. B. Araújo, M. T. Sykes e I. C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102: 8245-8250.
- Villaseñor J. L. y O. Téllez-Valdés. 2004. Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales Inst. Biol. UNAM, Serie Botánica* 75: 205-220.
- Ward D. F. 2007. Modelling the potential geographic distribution of invasive ant species in New Zealand. *Biol Invasions* 9: 723–735.