

# Informe final

## Índice de riesgo para mamíferos en México frente al cambio climático

**Responsable:** Dr. Víctor Sánchez Cordero Dávila

**Corresponsable:** Dr. Carlos Gay García

**Corresponsable externa:** Dra. Carolina Ureta Sánchez

**Colaboradores:** Dr. Edgar Andrés Sánchez García y Gabriela Mercedes Ramírez Barrón

**Colaboradoras externas:** Dra. Ángela Cuervo-Robayo, Dra. Alma Mendoza-Ponce y Dra. Mariana Munguía Carrera

## Resumen ejecutivo

Este proyecto refiere a la construcción de un índice de riesgo para mamíferos terrestres basado en el marco conceptual del IPCC, en el que el riesgo está en función de la vulnerabilidad (sensibilidad + capacidad adaptativa), la exposición y el peligro. Los mamíferos son el grupo de vertebrados más conocido y estudiado y, México, cuenta con el 12% de su diversidad y con el 30% de endemismos. El índice de riesgo que se propone incorpora información biológica y ecológica (a través de análisis correlativos) para cada especie, los grupos funcionales a los que pertenecen y el grupo taxonómico. Evaluar el riesgo a nivel de grupo funcional nos permite hacer inferencias sobre el impacto que puede tener el cambio climático sobre interacciones bióticas y, por tanto, las consecuencias a escala de comunidad. El conocer el riesgo del grupo taxonómico, permite inferir qué historia evolutiva y diversidad filogenética asociada debe ser protegida. Los resultados nos indican que, entre los grupos funcionales en mayor riesgo, se encuentran los carnívoros (Carnivora) que también representan los organismos con tallas corporales entre medianas-grandes y grandes. Otro grupo taxonómico en riesgo es el orden Artiodactyla que, al igual que los carnívoros, en general presentan tallas medianas-grandes y grandes. Los Carnivora están en la cúspide de la cadena alimenticia y son especies territoriales que requieren de grandes áreas para poder tener poblaciones reproductivas estables. Los herbívoros de gran tamaño como los que pertenecen al grupo de los Artiodactyla, limitan sucesiones ecológicas, por lo que la reducción en sus números podría cambiar los ecosistemas completamente. Por lo anterior, es claro que la pérdida de estos organismos podría traer consecuencias importantes a un nivel de ecosistema. Aplicar índices de riesgo como el presente en este trabajo en otros grupos de especies, contribuye a entender el riesgo directo e indirecto que puede tener el cambio climático sobre las especies y las comunidades biológicas en las que habitan.

## **Antecedentes**

El cambio climático antropogénico es una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad (Field et al. 2014) y los impactos en distintos grupos de especies ya han sido registrados y reportados (Schloss et al. 2012, Hagger et al. 2013, Santini et al. 2016, Velasco et al. 2021). Para evitar que se siga perdiendo la diversidad a la tasa actual por cambio climático y otras amenazas como el cambio de uso de suelo, es importante enfocar esfuerzos en identificar a las especies que se encuentren en mayor riesgo (Foden et al. 2009, Young et al. 2011, Foden and Young 2016, Jones and Cheung 2018, Pacifici et al. 2018). Esta identificación facilita el uso del presupuesto de una manera más efectiva (McCarthy et al. 2008, Joseph et al. 2009, Bennett et al. 2015, Stanton et al. 2015). El cambio climático puede impactar a la biodiversidad, de manera directa, por cambios en la temperatura y patrones de precipitación y, de manera indirecta, como disruptor de interacciones bióticas fundamentales para la supervivencia de la especie (Pounds et al. 2006, Memmott et al. 2007). Obtener información sobre ambos tipos de impactos puede ser muy útil para conocer las especies que estén en mayor riesgo. Hasta el momento, la vulnerabilidad al cambio climático ha sido evaluada a un nivel de especie a través de: 1) aproximaciones correlativas, 2) características biológicas, 3) aproximaciones mecanicistas (Young et al. 2011). Aun cuando la aproximación a través de la correlación (que a nivel de especie se ha llevado a cabo comúnmente con el uso de la herramienta del modelado de nicho ecológico (Peterson et al. 2011, Young et al. 2011)) ha sido sumamente útil para contestar diversas preguntas ecológicas incluyendo el riesgo al cambio climático, no consideran las características biológicas que son fundamentales para conocer la posibilidad de adaptación de las especies que determinan en gran medida su sensibilidad a cambios en el entorno (Aubin et al. 2016). En contraste, la aproximación basada únicamente en características biológicas, aunque permite la identificación de la sensibilidad y la capacidad adaptativa, carece de una vinculación directa con el sistema clima (Sandin et al. 2014). Otra aproximación que ha sido utilizada en la evaluación de impactos al cambio climático

es la mecanicista, que está basada en modelos que reportan procesos biológicos dependientes del clima y permiten proyectar la respuesta de las especies en escenarios de cambio climático o a condiciones climáticas o ambientales específicas (Ureta et al. 2012, Keith et al. 2014, Ureta et al. 2018). Estos modelos mecanicistas utilizan datos fisiológicos o demográficos de las especies (Ureta et al. 2012, Bozinovic and Pörtner 2015, Ureta et al. 2018), por lo que aunque son sumamente informativos, son muy complejos de obtener y requieren de muchos recursos económicos y tiempo (Conde et al. 2019). La mayoría de las especies que han sido descritas en el planeta no cuentan con este tipo de información, ni siquiera las que pertenecen a grupos muy conocidos como son los mamíferos, por lo que es información que muy posiblemente va a faltar cuando se trata de evaluar a todas las especies de un solo grupo.

Recientemente, la combinación de algunas de estas tres aproximaciones ha resultado exitosa y se han generado índices de vulnerabilidad más complejos y completos que reflejan de manera más asertiva el posible riesgo de las especies (Foden et al. 2009, Young et al. 2011). Por ejemplo, el índice propuesto por Foden y colaboradores evalúa características biológicas como la especialización del hábitat, el alimento, la tolerancia ambiental, dependencia a claves ambientales, la habilidad de dispersión, entre otras características. Otra propuesta de índice que ha sobresalido es la de NatureServe (Young et al. 2011). Este índice toma en cuenta características biológicas como la capacidad de dispersión, la sensibilidad a la temperatura y la humedad, así como las interacciones interespecíficas, respuestas fenológicas, entre otras; además de que utiliza modelos correlativos. Sin embargo, todas estas propuestas están basadas en el marco conceptual anterior del IPCC; es decir, el marco conceptual propuesto en 2007 (Solomon et al. 2007). En este reporte del IPCC 2007, la vulnerabilidad está definida como la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa. No obstante, desde el 2014 se propuso que el riesgo de las especies ante el cambio climático esté en función de la vulnerabilidad (sensibilidad + capacidad adaptativa), la exposición y el peligro (Field et al. 2014). El tener una base

conceptual clara y uniforme en la evaluación del riesgo ante el cambio climático, permite que haya mejor comunicación entre disciplinas y haya un avance más contundente y menos confuso. En la biodiversidad, los estudios relacionados con cambio climático han utilizado diferente terminología que impide hacer comparaciones y no facilita el avance. En el presente trabajo se pretende homogenizar el marco conceptual con el más reciente marco propuesto por el IPCC (2014), a través de evaluar el riesgo del cambio climático sobre especies de mamíferos terrestres. Los mamíferos es uno de los grupos de vertebrados más conocidos del mundo y, en México, se distribuye el 12% de las especies de este grupo y el porcentaje de endemismo es de ~30% (CONABIO 2020). La enorme diversidad de mamíferos presentes en México debería convertir su conservación en un tema prioritario a nivel mundial. El total de especies terrestres descritas ronda las 540 especies y son alrededor de 84 especies marinas. En un estudio con el que se trabajó el impacto del cambio climático sobre 60 especies de mamíferos terrestres, se obtuvo que el 50% perdía por lo menos la mitad de sus condiciones climáticas óptimas (Trejo et al. 2011), indicando así un importante grado de vulnerabilidad ante cambios en las condiciones climáticas. Dado el alto conocimiento biológico que se tiene sobre este grupo de especies, resulta un estudio de caso adecuado para probar la presente propuesta de índice de riesgo.

Hasta el momento, el único estudio publicado de biodiversidad y riesgo frente al cambio climático que ha utilizado el más reciente marco conceptual del IPCC es el de Pacifici et al. (2018). Sin embargo, su estudio se basó en la identificación de “hotspots” (zonas calientes o de mayor riesgo) geográficos de riesgo climático, en vez de evaluar el riesgo especie por especie. También existe una tesis de licenciatura realizada por la bióloga y colaboradora de este trabajo Gabriela Ramírez Barrón, en la que se evaluaron 12 mamíferos prioritarios de México con un índice de riesgo con el marco conceptual del IPCC 2014 para obtener cuáles estaban en mayor riesgo (Ramírez-Barrón 2018). En este estudio, se pretende evaluar el riesgo de todas las especies de mamíferos terrestres mexicanos con un índice de riesgo más completo, a través de la combinación de: a) identificar las características

biológicas de las especies que las hacen vulnerables al cambio climático, y b) uso de herramientas correlativas. Con esta información creamos un índice de riesgo en el que la vulnerabilidad se obtuvo a través de la revisión de la literatura científica y del conocimiento experto (sensibilidad), y del área de distribución potencial climática dentro de áreas naturales protegidas en el futuro en comparación del presente (capacidad adaptativa). Asumimos que, las especies tienen mayor capacidad adaptativa, cuando están en un entorno con menor presión por otros factores como el cambio de uso de suelo. La exposición se obtuvo de los cambios del área de distribución potencial en zonas viables en el futuro dependiendo de las proyecciones de cambio de uso de suelo. Finalmente, el peligro se representó a través de evaluar qué tanta área climáticamente idónea se empalma con áreas en las que hay una mayor probabilidad de huracán con una intensidad determinada, con un mayor número de incendios según el registro histórico, y con áreas que presentan mayores cambios en temperatura media anual y precipitación anual.

Nuestro índice de riesgo no solo evaluará el riesgo especie por especies, sino que pretende evaluar el riesgo a nivel de grupos funcionales y del grupo taxonómico de orden. Los grupos funcionales están conformados por especies con funciones ecológicas similares, sin tomar en cuenta el linaje evolutivo (Duckworth et al. 2000). En contraste, el nivel taxonómico de orden está integrado por especies con el mismo linaje evolutivo aunque tengan funciones ecológicas distintas. La obtención de información sobre el riesgo que estos grupos puedan tener ante escenarios de cambio climático, nos puede indicar posibles consecuencias en las interacciones biológicas y riesgos en la desaparición de todo un linaje evolutivo.

## Métodos

### *El análisis correlativo*

El análisis correlativo está basado en el modelado de nicho ecológico y es a través de su resultado que podemos obtener información de partes del índice como la capacidad adaptativa, la exposición y el peligro. El principio del modelado de nicho ecológico es relacionar las presencias georreferenciadas con las características ambientales (en este caso climáticas), para crear un perfil ambiental (en este caso climático) idóneo en el que la especie podría existir. Es decir, se trata de hacer una aproximación de lo que sería el nicho ecológico de la especie a través de las presencias registradas. El perfil ambiental se puede proyectar a otras áreas geográficas u otros tiempos para conocer el área de distribución potencial o ADP. Esta relación se hace a través de funciones matemáticas con ayuda de algoritmos (Peterson et al. 2011).

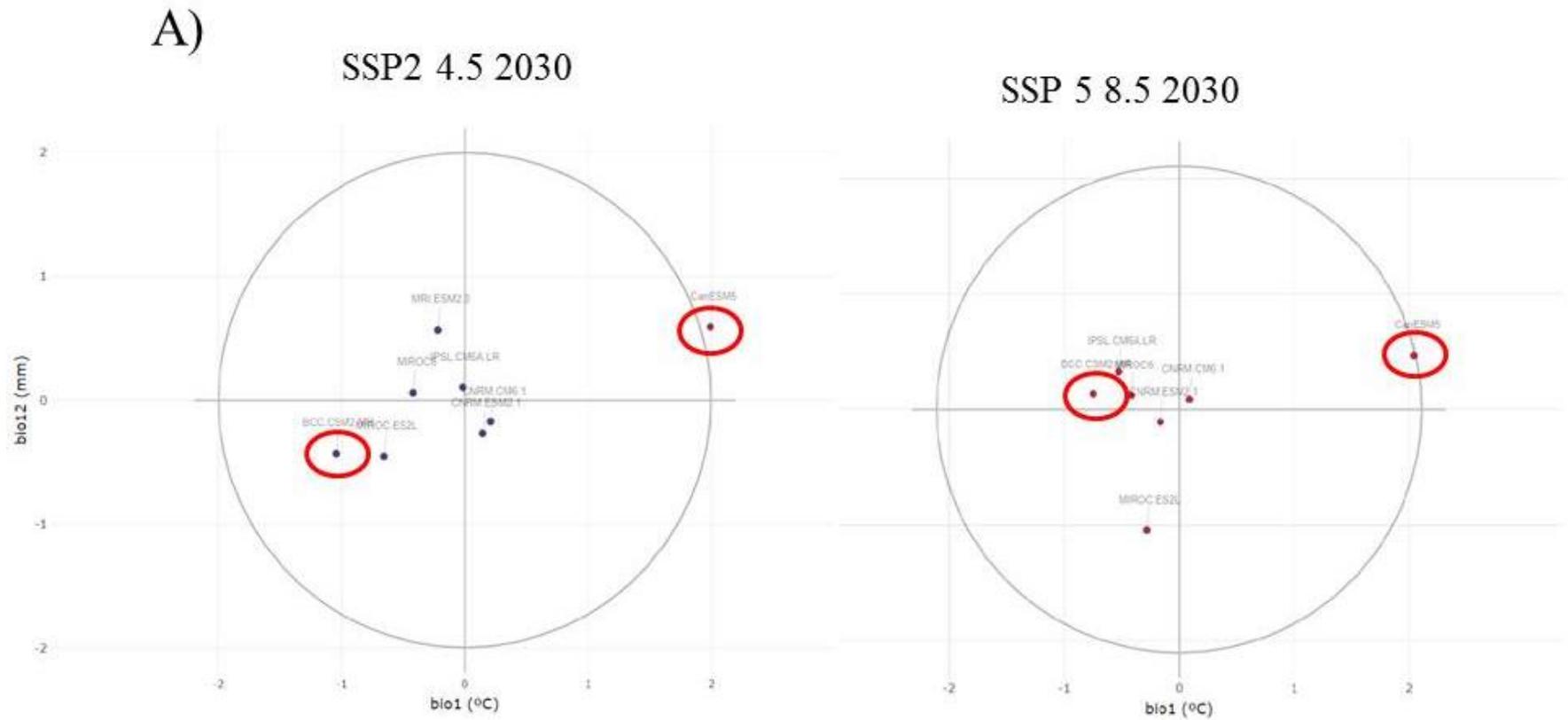
De las 463 especies de mamíferos terrestres descritos en México que cuentan con información geográfica (SEMARNAT 2010, CONABIO 2020) se modelaron 462 que fueron las que obtuvieron un número mínimo de 25 registros únicos georreferenciados a una distancia mínima entre ellos de 10 km en especies no endémicas y de 5 km en especies endémicas. De las especies no endémicas, tomamos en cuenta la distribución en toda América para calibrar el modelo, pues se pretende obtener la mayor cantidad de información posible sobre el nicho de la especie. Nuestra primera opción de base de datos fue la de CONABIO (SNIB 2020), que ha sido revisada por varios expertos del grupo. Cuando las especies no tenían un número mínimo de 25 registros, utilizamos información de los polígonos provenientes de la IUCN (Alhajeri and Fourcade 2019). Los modelos creados con datos de los polígonos de la IUCN han demostrado tener resultados biológicamente aceptables (Alhajeri and Fourcade 2019). A pesar de que se ha discutido ampliamente el número mínimo de registros para hacer un buen modelo de nicho ecológico, un estudio en el que se evaluaron modelos con un número distinto

de registros propuso que 25 registros únicos, en general, proporcionaban un modelo con buena capacidad predictiva (Pearson et al. 2007). El número máximo de registros utilizado fue de 300. Para las especies con más de 300 registros que provenían de la base de datos del SNIB, eliminamos puntos con mucha cercanía entre sí. Para saber qué punto eliminar del par de puntos, se evaluó la distancia promedio de ambos puntos con el resto de los puntos, el que tuviera el promedio más bajo fue eliminado. Para las especies con más de 300 puntos que provenían de la base de datos de la IUCN, hicimos un muestreo con un ajuste exponencial cuyos parámetros dependían del número máximo y mínimo de registros de la especie de interés.

Para hacer las proyecciones en condiciones de cambio climático, decidimos utilizar dos modelos de circulación general contrastantes (GCMs por sus siglas en inglés, BCC-CSM2.MR and CanESM5) y dos escenarios contrastantes (SSP2-4.5, SSP5-8.5). En un estudio liderado por Altamirano del Carmen et al. (2021), 21 GCMs (WCRP 2021) fueron evaluados y CanESM5 fue uno de los modelos con mejor desempeño para simular el clima en el hemisferio norte en el que se encuentra México, y como es uno de los modelos que están disponibles en línea de la última generación de modelos CMIP6, se decidió utilizarlo. A comparación de otros modelos, el CanESM5 simula climas más cálidos y lluviosos. Para escoger un segundo modelo seguimos la sugerencia de Shepherd et al., (2018), en la que se propone utilizar modelos contrastantes para obtener los resultados posibles más contrastantes entre sí. Un modelo contrastante para nuestra área geográfica es el BCC-CSM2.MR que proyecta condiciones más cálidas y frías que el CanESM5 (**Figura 1**. Evaluación de modelos de circulación general) y cuyas capas también están disponibles en línea (Fick and Hijmans 2017). Como es del conocimiento de quienes trabajan con cambio climático, los GCMs tienen diferentes escenarios o hipótesis socioeconómicas que incorporan características demográficas, sociales, patrones económicos, fragmentación, entre otros (Carbon Brief 2018). El primer escenarios que utilizamos en este trabajo (SSP2-4.5), representa un patrón económico y social similar al actual (representaría en este caso el

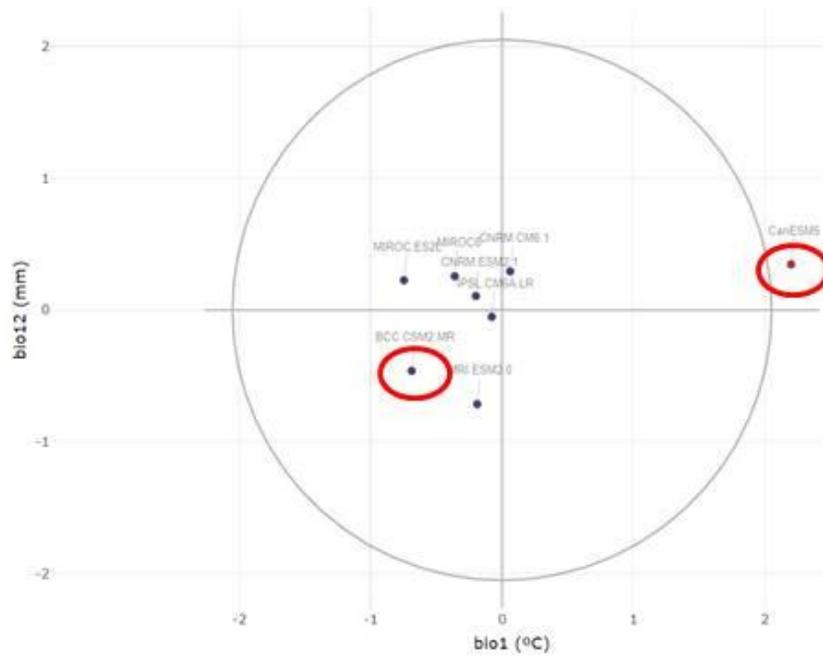
escenario optimista); mientras que, el segundo escenario evaluado, proyecta un mundo con un crecimiento económico acelerado y un estilo de vida que requiere de un gran consumo de energía (SSP5-8.5) (escenario pesimista). Las evaluaciones se realizaron en tres horizontes de tiempo: 2030 (2021–2040), 2050 (2041–2060) and 2070 (2081–2100) (Fick and Hijmans 2017).

**Figura 1.** Comparación entre Modelos de Circulación General en tres tiempos: A) 2030 (2021–2040), B) 2050 (2041–2060) y C) 2070 (2081–2100).

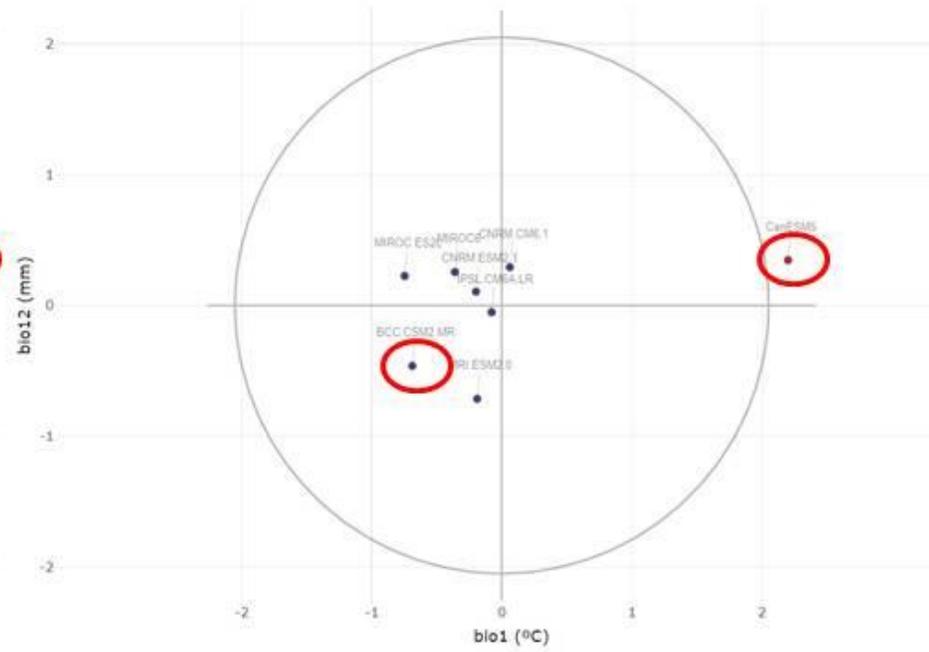


B)

SSP2 4.5 2050

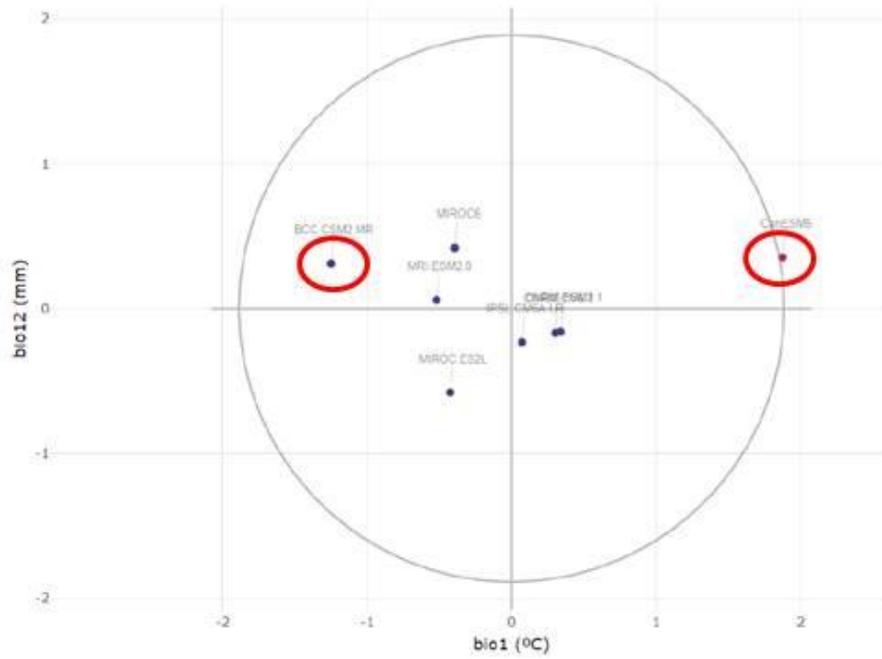


SSP 5 8.5 2050

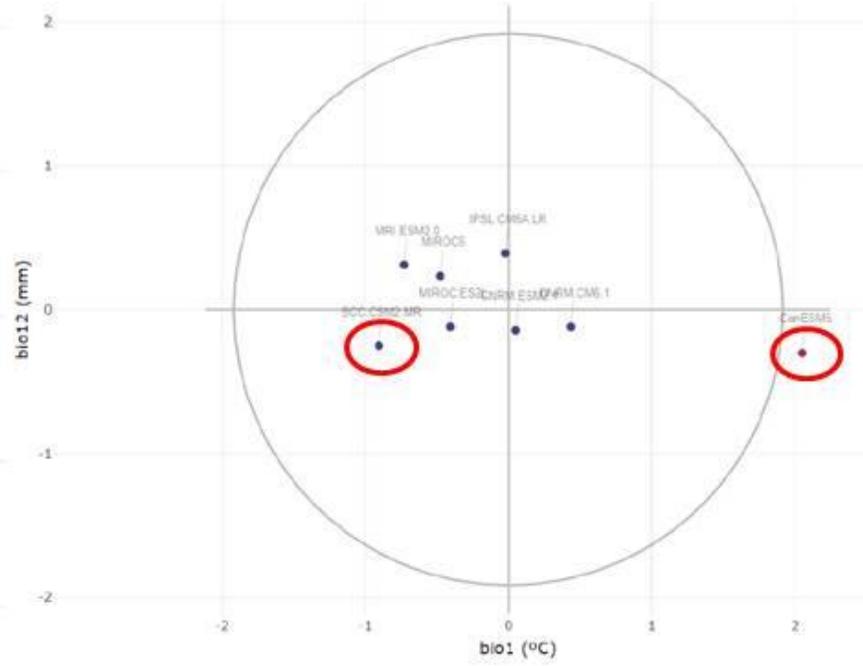


C)

SSP2 4.5 2070



SSP 5 8.5 2070



El modelado de nicho ecológico (el análisis correlativo), se llevó a cabo a través de la plataforma de BIOMOD que facilita el uso simultáneo de diferentes algoritmos (Thuiller et al. 2009). El área de calibración y transferencia fue determinada por la intersección entre las ecorregiones en las que se encontraba al menos un registro de la especie y un buffer de 3° alrededor de los registros. A esta intersección, se le agregó un segundo buffer de 2°. Con esta manera de determinar el área geográfica para calibrar y proyectar el modelo, se consideran las zonas que serían potencialmente viables para la especie, según su capacidad de dispersión y su ecología. Utilizamos diferentes algoritmos que maximizan su desempeño con un número de réplicas = 10 y un número de pseudoausencias =1000: GLM, GAM, CTA and RF (Barbet-Massin et al. 2012). También utilizamos GBM and Maxent y aunque estos algoritmos no fueron probados por Barbet-Massin et al. 2021, se usaron porque en una prueba aleatoria con 20 especies en la que se utilizaron las réplicas y pseudoausencias antes mencionadas, fueron de los algoritmos con mejor desempeño (ROC, TSS, Kappa). Se utilizó el 70% de los registros para calibrar el modelo y 30% para validarlo. Creamos mapas binarios a través de la maximización de la prueba ROC. Finalmente, creamos un solo mapa por cada escenario y tiempo, a través del ensamble pesado de los mapas obtenidos de cada réplica y de cada algoritmo.

### *Características biológicas*

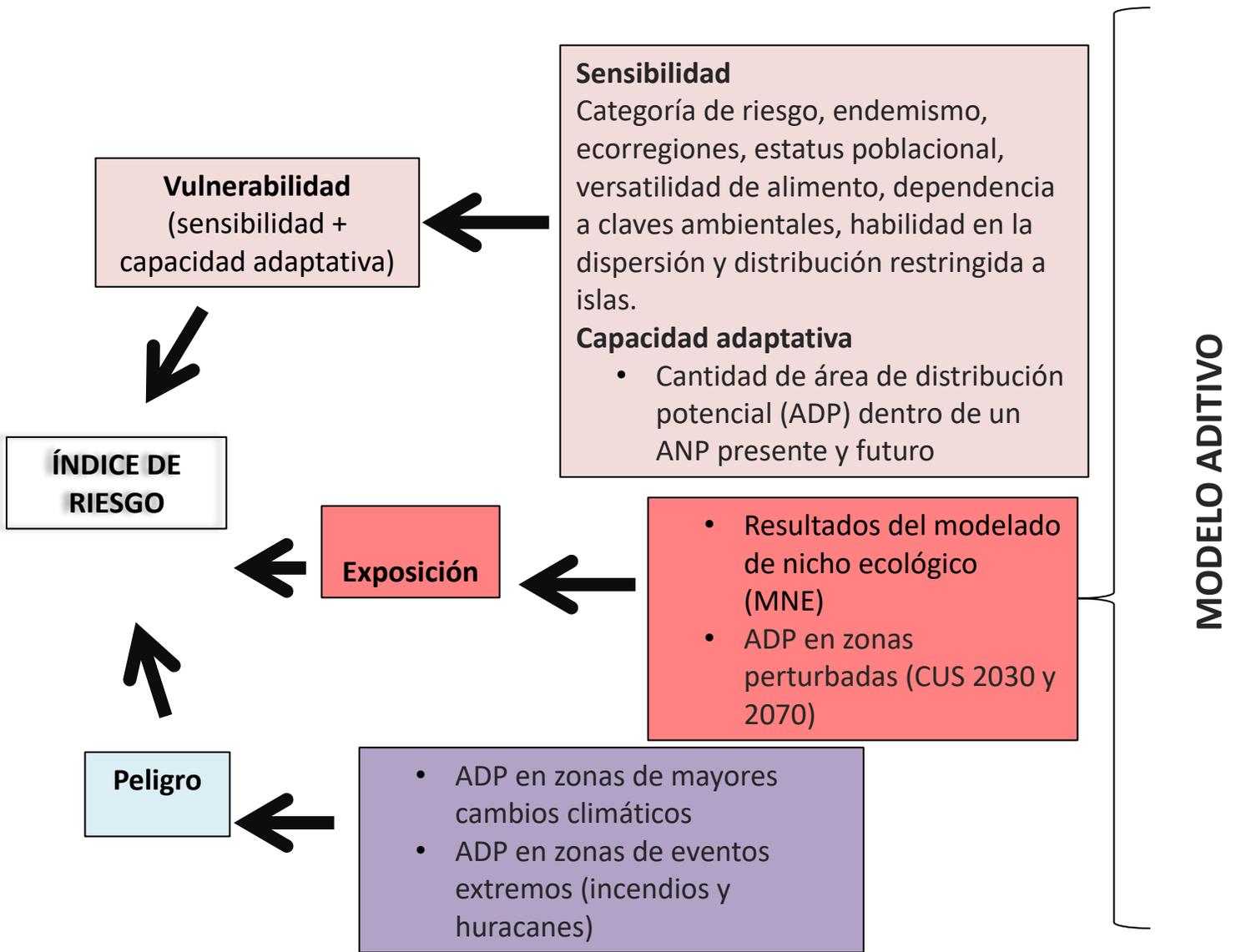
En el presente índice de riesgo, incorporamos como parte de la vulnerabilidad a la sensibilidad que corresponde a una aproximación basada en características biológicas que hacen a la especie susceptible al cambio climático (Sandin et al. 2014). La sensibilidad es una manera de evaluar el grado con el que cada especie (o algún otro sistema biológico) puede ser impactada directa o indirectamente por cambios en el clima. La otra parte de la vulnerabilidad está en función de la capacidad adaptativa de la especie (u otro sistema biológico), es decir el potencial que tiene de aminorar y de lidiar con los cambios en el

clima (Field et al. 2014). Las características biológicas que fueron consideradas para cada especie fueron: el número de ecorregiones en el que la especie se ha registrado (que es una manera de aproximar la plasticidad biológica), la categoría de riesgo actual (IUCN), el endemismo, el estatus de la población, la versatilidad de alimentación, la dependencia a claves ambientales, la habilidad en la dispersión y si su distribución estaba o no restringida a islas. La información para cada especie fue obtenida a través de una revisión exhaustiva de la literatura científica y por conocimiento experto de miembros del proyecto y de expertas y expertos invitados (ejemplo: Dra. Mariana Munguía) (Material suplementario S1). Las características biológicas fueron divididas en categorías y dependiendo de la categoría se asignaba un valor que podía ser positivo, negativo o neutro (ver Material suplementario S1).

### *Construcción del índice de riesgo*

El índice de riesgo propuesto está definido con base en el marco conceptual más reciente del IPCC en el que el riesgo está en función de la vulnerabilidad (sensibilidad + capacidad adaptativa), la exposición y el peligro. En este estudio evaluamos el índice de manera separada y obtuvimos un valor para cada parte del índice (vulnerabilidad, exposición y peligro) y un valor final (riesgo). El primer valor o puntaje lo obtuvimos de la sensibilidad (las características biológicas antes mencionadas) y a través de sobre poner el cambio porcentual entre el presente y futuro del área de distribución potencial (ADP) en un área natural protegida (ANP) (CONANP 2021). El área de distribución potencial o ADP se entiende como el área geográfica que presenta las características climáticas idóneas en las que una especie podría existir según la información recabada entre las presencias georreferenciadas y la asociación con las variables climáticas evaluadas a través de los algoritmos seleccionados. Tenemos el supuesto de que mientras más ADP climática de la especie esté dentro de una ANP (Oliver and Morecroft 2014), la

especie tendrá mayor capacidad adaptativa pues la presión viene principalmente del cambio en el clima y no existen otros factores que estén ejerciendo otra presión que pudiera actuar de manera sinérgica con los cambios en las condiciones climáticas. Para cada variable evaluada se realizó una división del puntaje de cada especie entre el puntaje máximo, pues lo que buscamos es identificar a las especies en mayor riesgo en relación con las demás especies del grupo (**Figura 2**).



**Figura 2.** Propuesta metodológica para crear el índice de riesgo.

En el caso de la exposición, dado que varios estudios que analizan cambio climático y biodiversidad, lo evalúan a través del modelado de nicho ecológico (Foden et al. 2009), decidimos irnos también en esa dirección. Primero evaluamos el cambio porcentual de ADP entre el presente y futuro y, posteriormente, para cada especie se hizo una división por el valor encontrado más alto. Dado que esta es la parte correlativa del análisis y que otras partes del índice están relacionadas con este resultado, decidimos que sería la única parte del índice a la que le proporcionaríamos un peso (Material suplementario S2). En esta parte de la exposición también incorporamos el cambio de uso de suelo (Mendoza-Ponce et al. 2018) que se proyecta a futuro y, se calculó, el número de pixeles que caen en zonas con la aptitud en términos de uso de suelo para que la especie pueda habitar. Lo dividimos en dos versiones: con principio precautorio (en el que las zonas agrícolas de temporal no fueron consideradas como viables para la presencia de poblaciones reproductivas de mamíferos) y, sin principio precautorio (en el que las zonas agrícolas de temporal sí son viables para la presencia de los mamíferos). Algunos estudios han sugerido que las poblaciones de mamíferos pequeños pueden establecerse en áreas de agricultura de pequeña escala (i.e., Pekin and Pijanowski 2012, Riojas-López et al. 2018), pero para otro tipo de mamíferos establecerse en esas condiciones es prácticamente imposible (Hidalgo-Mihart et al. 2019). Posterior a los cálculos, cada valor de cada variable es dividido por el valor máximo de esa variable en particular.

Finalmente, el peligro se ha definido como la ocurrencia potencial de un evento físico que pueda ocasionar daño a la especie (o al sistema en estudio) (Field et al. 2014). En este estudio nosotros inferimos el peligro a través de cambios en la temperatura media anual, la precipitación anual, el número de incendios en la zona y el número e intensidad de huracanes. En cuanto a la temperatura y la precipitación, se calculó el promedio del cambio en la ADP futura de la especie. También obtuvimos el número de incendios que se podrían esperar en el ADP futuro y el promedio pesado de la intensidad de huracanes. La información sobre incendios y huracanes fue obtenida de observaciones (1970–2015 y

2001–2019, respectivamente) (GRDP 2021, NASA 2021). Para los huracanes, la intensidad se calculó por el promedio de la categoría del huracán y la intensidad del mismo en una rejilla de 10 km<sup>2</sup>. Cada valor de cada especie también fue dividido por el valor máximo de la variable.

Las variables que tienen una relación negativa con el riesgo fueron multiplicadas por -1 (cambio de uso de suelo, cambio de temperatura, cambio de precipitación, número de incendios e intensidad de huracanes) (Material suplementario S2) y, posteriormente, cada variable fue sumada para obtener un puntaje por cada componente del índice: vulnerabilidad, exposición y peligro. El índice de riesgo fue conseguido a través de sumar los tres componentes, pero se obtuvo dos riesgos finales: uno con la exposición tomando en cuenta el principio precautorio y, otro, sin tomar en cuenta el principio precautorio. Una vez que se calculó el riesgo para cada una de las especies, se sumaron los puntajes según su grupo funcional o el orden taxonómico al que pertenecían. Los grupos funcionales que se tomaron en cuenta fueron: el grupo trófico, la movilidad y la masa corporal. Estos grupos representan funciones ecológicas distintas que permiten saber si existe alguna interacción biótica que podría alterar el funcionamiento de comunidades biológicas (Rosenfeld 2002). En cambio, el desempeño de cada grupo taxonómico nos permite tener idea de qué linaje evolutivo y diversidad asociada pudiera estar en mayor riesgo.

## Resultados

En este proyecto nos comprometimos a los siguientes resultados:

<b>Meta</b>	<b>Porcentaje de avance</b>
Mapas de distribución potencial presente y futuro	100% de los mapas. Estarán disponibles en una plataforma abierta al público en la que nos indique el PINCC.
Mapas de riqueza de mamíferos en el presente y futuro	100% de los mapas. Estarán disponibles en una plataforma abierta al público en la que nos indique el PINCC.
Lista de especies según su nivel de riesgo	100% de avance. Estas tablas están disponibles en el presente informe a través del Material suplementario S1 y S2. En el S1 se encuentran las características biológicas de las especies evaluadas y en el S2 se encuentran todos los componentes del índice de riesgo bajos todos los escenarios y tiempos evaluados.
Lista de grupos funcionales según su nivel de riesgo	100% de avance. La información de a qué grupo funcional y orden pertenece cada una de las especies evaluadas se encuentra en el Material suplementario S2. También tenemos unas figuras que permiten la evaluación de los grupos en el Material suplementario S3.
Borrador de artículo científico	En preparación y por ser sometido con agradecimientos el PINCC a la revista Global Change Biology.

Dado que gran parte del índice de riesgo está basado en el análisis correlativo, todas las especies que no tuvieran distribución potencial en México en el presente o futuro fueron eliminadas del análisis porque no era posible seguir con el resto del índice. Las especies que en algún momento se han visto en México pero que tienen poca información georreferenciada en nuestro país y por lo tanto no tienen ADP en el presente son *Vulpes vulpes*, *Eumops hansae* y *Microtus pennsylvanicus*. Las especies cuya distribución potencial en algún escenario propuesto se reduce al 100% y por lo tanto no se puede seguir con el resto del índice son las siguientes: *Centronycteris centralis*, *Cratogeomys fulvescens*, *Cryptotis goodwini*, *Dipodomys deserti*, *Geomys tropicalis*, *Microtus umbrosus*, *Peromyscus guardia*, *Peromyscus hooperi*, *Peromyscus nasutus*, *Peromyscus polius*, *Reithrodontomys spectabilis*, *Sorex ornatus* y *Tamiasciurus mearnsi* (**Tabla 1**).

Scientific Name	Scenario	GCM	Year	Order	Trophic group	Locomotion group	Body mass group	Sensibility Score
<i>Centronycteris centralis</i>	585	BCC	2070	Chiroptera	Insectivore	Volant	Small	0.086
<i>Centronycteris centralis</i>	585	CAN	2070	Chiroptera	Insectivore	Volant	Small	0.086
<i>Cratogeomys fulvescens</i>	245	CAN	2050	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	0.011
<i>Cratogeomys fulvescens</i>	245	CAN	2070	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	0.011
<i>Cratogeomys fulvescens</i>	585	CAN	2050	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	0.011
<i>Cratogeomys fulvescens</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	0.011
<i>Cryptotis goodwini</i>	585	BCC	2070	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	0.065
<i>Cryptotis goodwini</i>	585	CAN	2070	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	0.065
<i>Dipodomys deserti</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Granivore	Semifossorial	Small	0.022
<i>Geomys tropicalis</i>	585	BCC	2070	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	-0.032
<i>Microtus umbrosus</i>	585	BCC	2050	Rodentia	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-0.032
<i>Microtus umbrosus</i>	585	BCC	2070	Rodentia	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-0.032
<i>Peromyscus guardia</i>	585	BCC	2070	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	-0.054
<i>Peromyscus hooperi</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	0.054
<i>Peromyscus nasutus</i>	245	CAN	2070	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	0.129
<i>Peromyscus nasutus</i>	585	CAN	2050	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	0.129
<i>Peromyscus nasutus</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	0.129
<i>Peromyscus polius</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	0.005
<i>Procyon pygmaeus</i>	585	BCC	2030	Carnivora	Carnivorous ominivorous	Semiarboreal	Medium-big	-0.054
<i>Procyon pygmaeus</i>	585	BCC	2050	Carnivora	Carnivorous ominivorous	Semiarboreal	Medium-big	-0.054
<i>Procyon pygmaeus</i>	585	BCC	2070	Carnivora	Carnivorous ominivorous	Semiarboreal	Medium-big	-0.054
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	585	BCC	2030	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-0.075
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	585	BCC	2050	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-0.075
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	585	BCC	2070	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-0.075
<i>Reithrodontomys tenuirostris</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-0.022
<i>Sorex ornatus</i>	585	CAN	2070	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Very small	0.118
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	BCC	2030	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.376
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	CAN	2030	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.376
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	BCC	2050	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.376
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	CAN	2050	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	BCC	2070	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	245	CAN	2070	Rodentia	Frugivore omivore	Semiarboreal	Medium	0.032

Scientific Name	Scenario	GCM	Year	Order	Trophic group	Locomotion group	Body mass group	Sensibility Score
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	BCC	2030	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	CAN	2030	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	BCC	2050	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	CAN	2050	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	BCC	2070	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032
<i>Tamiasciurus mearnsi</i>	585	CAN	2070	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium	0.032

**Tabla 1.** Especies que pierden el 100% de su área de distribución potencial (ADP) en alguno de los escenarios evaluados.

Esta lista de especies nos indica que es muy importante poner atención a estas especies principalmente en escenarios de cambio climático, pues se proyecta que sus condiciones climáticas idóneas desaparecerán en los escenarios propuestos. Sin embargo, también es importante fijarse en su sensibilidad para conocer qué tanto podrán lidiar con los cambios y adaptarse. Si consideramos que los valores de sensibilidad van de  $-0.075$ – $1$ , podemos decir que las especies cuya distribución espacial en nuestro país se reducen al 100% en los escenarios de cambio climático propuestos y que tiene valores de sensibilidad muy bajos, son de las especies en mayor riesgo en escenarios de cambio climático. Esto resulta debido a que, además de perder condiciones climáticamente idóneas, tienen características que no les permiten una fácil adaptación. En el decil de especies con mayor riesgo, tomando en cuenta el principio precautorio en el escenario SSP2 4.5 bajo el MCG CanESM5 (2030), nos damos cuenta de que los órdenes más frecuentes en este decil de alto riesgo se encuentra Rodentia, seguidos por, Chiroptera y Carnivora (**Tabla 2**). Sin embargo, en general, los roedores son muy abundantes. Los roedores y murciélagos son los grupos de mamíferos más abundantes (208 y 145 respectivamente), así que aunque aparecen dentro del decil más alto en términos de riesgo, representan el 8 y el 10% de sus especies respectivamente. Otros grupos presentes en el decil de riesgo más alto son Carnivora (5/32), Artiodactyla (2/9) y Eulipotyphla (3/34). Es de mayor preocupación que, 2 de 9 especies evaluadas del orden Artiodactyla, estén entre las especies de mayor riesgo, al igual que 5 de 32 de Carnivora lo estén y, que una de las dos especies descritas del orden Cingulata. En términos de diversidad filogenéticas, esos son los grupos que pudieran estar en mayor riesgo frente al cambio climático. Si no tomamos en cuenta el principio precautorio, los resultados siguen siendo muy similares. Es importante mencionar que, dependiendo del escenario evaluado, los valores de riesgo y, por lo tanto, las especies en los deciles de mayor riesgo pueden variar (Material suplementario S2). De igual manera, si lo vemos a través del tiempo. En términos de grupos funcionales, los grupos tróficos que pueden estar en mayor riesgo son los Sanguinívoros (1/3) y Piscívoros (2/7), en cuanto a hábito son los semiacuáticos (3/13) y

en cuestión de masa corporal los grandes (3/17) y medianos-grandes (5/33) lo que está muy relacionado con el riesgo de los Carnivora y Artiodactyla.

Scientific Name	Order	Trophic group	Locomotion group	Body mass group	Final Score WPP	Final Score WOPP
<i>Microtus umbrosus</i>	Rodentia	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-7.591	-7.591
<i>Peromyscus guardia</i>	Rodentia	Omnivore granivore	Terrestrial	Small	-4.948	-4.73
<i>Cryptotis goodwini</i>	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-4.79	-4.698
<i>Rhogeessa genowaysi</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-4.049	-4.047
<i>Tylomys bullaris</i>	Rodentia	Insectivore omnivorous	Arboreal	Medium	-4.042	-4.037
<i>Neotoma insularis</i>	Rodentia	Frugivore herbivore	Terrestrial	Medium	-3.501	-3.393
<i>Myotis peninsularis</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-3.334	-1.996
<i>Reithrodontomys tenuirostris</i>	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-3.244	-3.239
<i>Centronycteris centralis</i>	Chiroptera	Insectivore	Volant	Small	-2.998	-2.997
<i>Cratogeomys fulvescens</i>	Rodentia	Herbivore grazer	Fossorial	Medium	-2.829	-2.82
<i>Microtus guatemalensis</i>	Rodentia	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-2.794	-2.694
<i>Sigmodon hirsutus</i>	Rodentia	Herbivore	Terrestrial	Small	-2.72	-1.348
<i>Mazama pandora</i>	Artiodactyla	Frugivore herbivore	Terrestrial	Large	-2.712	-1.219
<i>Cryptotis tropicalis</i>	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Very small	-2.628	-2.451
<i>Rheomys thomasi</i>	Rodentia	Piscivore	Semiaquatic	Small	-2.601	-2.591
<i>Neotoma angustapalata</i>	Rodentia	Frugivore herbivore	Semi-arboreal	Medium	-2.595	-2.203
<i>Sturnira lilium</i>	Chiroptera	Frugivore	Volant	Very small	-2.574	-1.245
<i>Odocoileus virginianus</i>	Artiodactyla	Herbivore browser	Terrestrial	Large	-2.51	-1.312
<i>Dipodomys gravipes</i>	Rodentia	Granivore	Semifossorial	Small	-2.509	-2.51
<i>Caluromys derbianus</i>	Didelphimorphia	Frugivore omnivore	Arboreal	Medium	-2.493	-2.464
<i>Dasybus novemcinctus</i>	Cingulata	Insectivore omnivorous	Semifossorial	Medium-big	-2.492	-1.16
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-2.485	-0.398
<i>Balantiopteryx io</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.459	-2.339
<i>Artibeus intermedius</i>	Chiroptera	Frugivore	Volant	Small	-2.453	-1.131
<i>Lontra longicaudis</i>	Carnivora	Piscivore	Semiaquatic	Medium-big	-2.404	-1.031
<i>Pteronotus davayi</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.397	-1.288
<i>Reithrodontomys fulvescens</i>	Rodentia	Granivore	Terrestrial	Very small	-2.383	-1.427
<i>Desmodus rotundus</i>	Chiroptera	Sanguinivore	Volant	Small	-2.333	-0.947
<i>Pteronotus parnellii</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.325	-0.972
<i>Mimon cozumelae</i>	Chiroptera	Insectivore under canopy	Volant	Small	-2.312	-1.625
<i>Spilogale putorius</i>	Carnivora	Insectivore omnivorous	Terrestrial	Medium	-2.293	-1.107
<i>Oryzomys palustris</i>	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiaquatic	Small	-2.277	-0.982

Scientific Name	Order	Trophic group	Locomotion group	Body mass group	Final Score WPP	Final Score WOPP
<i>Procyon lotor</i>	Carnivora	Carnivorous omnivorous	Semiarboreal	Medium-big	-2.273	-1.221
<i>Dipodomys deserti</i>	Rodentia	Granivore	Semifossorial	Small	-2.269	-2.264
<i>Peropteryx macrotis</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.259	-1.411
<i>Tapirus bairdii</i>	Perissodactyla	Frugivore herbivore	Terrestrial	Large	-2.252	-1.083
<i>Artibeus lituratus</i>	Chiroptera	Frugivore	Volant	Small	-2.237	-0.855
<i>Nasua narica</i>	Carnivora	Frugivore omnivore	Semiarboreal	Medium-big	-2.225	-0.958
<i>Cuniculus paca</i>	Rodentia	Frugivore granivore	Terrestrial	Medium-big	-2.224	-1.208
<i>Oryzomys couesi</i>	Rodentia	Frugivore omnivore	Semiaquatic	Small	-2.189	-0.898
<i>Natalus stramineus</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.176	-0.999
<i>Lasiurus blossevillii</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.169	-1.059
<i>Microtus oaxacensis</i>	Rodentia	Insectivore under canopy	Semifossorial	Small	-2.168	-2.114
<i>Cryptotis phillipsii</i>	Eulipotyphla	Insectivore under canopy	Semifossorial	Very small	-2.168	-1.304
<i>Lasiurus ega</i>	Chiroptera	Aerial insectivore	Volant	Very small	-2.168	-0.983
<i>Mephitis macroura</i>	Carnivora	Insectivore omnivorous	Semifossorial	Medium	-2.162	-1.214

**Tabla 2.** Especies en el decil más alto de riesgo en el escenario SSP2 4.5 bajo el MCG CanESM5 horizonte de tiempo 2030.

En cuanto a las zonas de mayor riqueza, podemos decir que en el tiempo presente, las zonas de mayor riqueza están concentradas en las zonas montañosas de la República Mexicana (**Figura 3**). Las zonas de Jalisco, Veracruz y Chiapas son las que en la actualidad tienen el potencial climático para albergar un mayor número de especies. En condiciones de cambio climático, ese patrón geográfico de riquezas es muy similar y se mantiene a través del tiempo, aunque hay una reducción importante del área de distribución potencial de las especies. Entre los escenarios evaluados (CanESM5 SSP2 4.5 y SSP5 8.5; y BCC-CSM2.MR SSP2 4.5 y SSP5 8.5), se puede esperar una mediana en la pérdida de distribución potencial con los siguientes rangos: 2030 = -0.027--0.077, 2050 = -0.13--0.201 y 2070 = -0.135--0.371 (**Tabla 3**). Esta reducción de ADP a través del tiempo también es posible verla en las figuras del Material suplementario 3, que muestran cada componente del índice por el grupo taxonómico y todos los grupos funcionales evaluados.

		<b>ADP</b>				
		245 BCC	245 CAN	585 BCC	585 CAN	Range
<b>2030</b>	Mean	0.186	0.062	0.072	0.024	0.024–0.1863
	Median	0.062	0.077	0.052	0.028	0.027–0.077
<b>2050</b>	Mean	0.130	0.086	0.166	0.112	0.085–0.166
	Median	0.135	0.130	0.201	0.198	0.130–0.201
<b>2070</b>	Mean	0.122	0.102	0.163	0.163	0.102–0.164
	Median	0.135	0.174	0.269	0.371	0.135–0.371

**Tabla 3.** Media y mediana de la pérdida porcentual del área de distribución potencial (ADP) entre el presente y los diferentes escenarios evaluados.

Además de evaluar la pérdida en área con condiciones climáticas idóneas para cada especie en estudio, incorporamos el cambio de uso de suelo para conocer qué porcentaje del ADP sería viable. Tenemos dos escenarios posibles: con principio precautorio y sin principio precautorio (**Tabla 4**). Si consideramos que las áreas de agricultura de temporal no serán óptimas para el establecimiento de

poblaciones de mamíferos, más del 20% del área viable climáticamente en el futuro no podrá ser ocupada por cuestiones de cambio de uso de suelo.

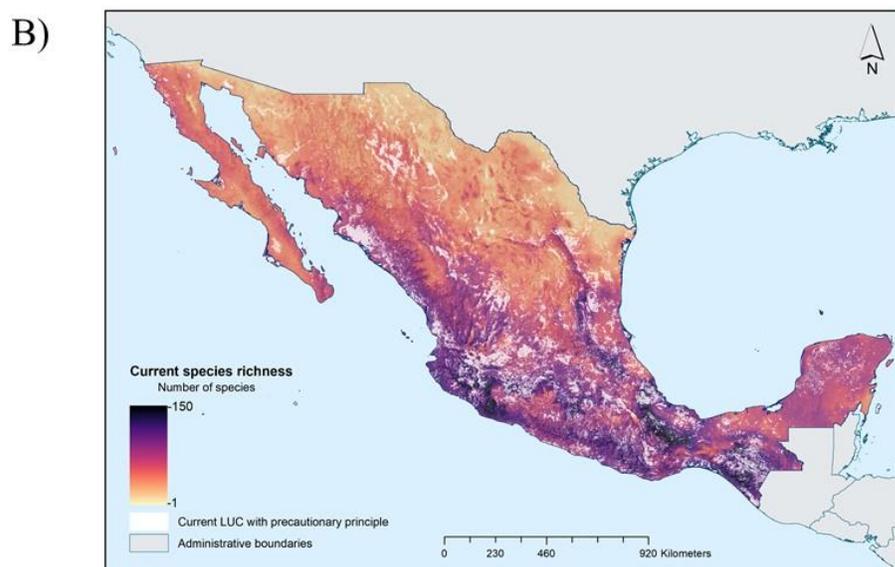
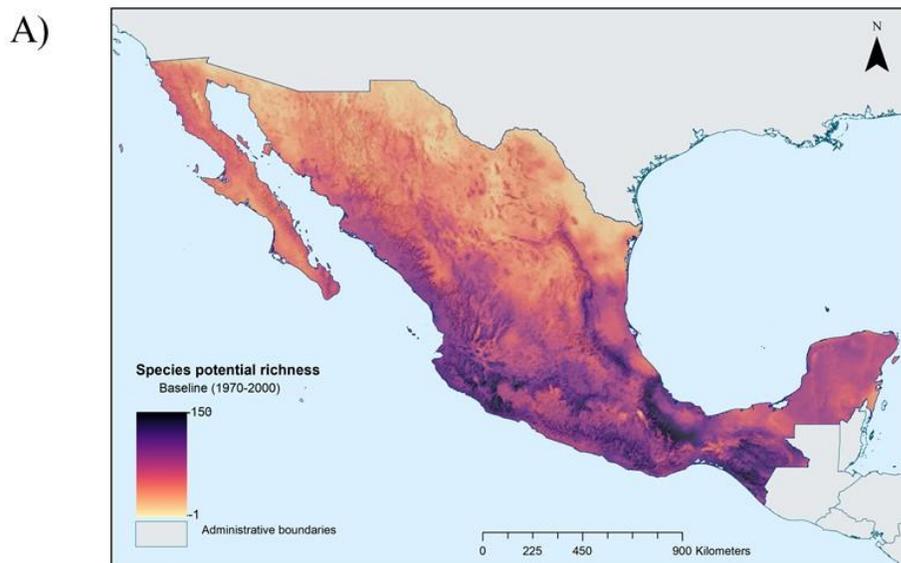
		<b>WPP</b>				
		245 BCC	245 CAN	585 BCC	585 CAN	Range
<b>2030</b>	Mean	0.237	0.240	0.235	0.233	0.233–0.240
	Median	0.240	0.240	0.240	0.237	0.237–0.240
<b>2050</b>	Mean	0.252	0.259	0.249	0.257	0.249–0.257
	Median	0.258	0.265	0.255	0.265	0.255–0.265
<b>2070</b>	Mean	0.268	0.277	0.266	0.271	0.266–0.277
	Median	0.279	0.285	0.276	0.285	0.276–0.285
		<b>WOPP</b>				
		245 BCC	245 CAN	585 BCC	585 CAN	Range
<b>2030</b>	Mean	0.083	0.082	0.082	0.080	0.080–0.083
	Median	0.081	0.079	0.081	0.078	0.078–0.081
<b>2050</b>	Mean	0.092	0.092	0.089	0.089	0.089–0.089
	Median	0.090	0.090	0.086	0.088	0.086–0.088
<b>2070</b>	Mean	0.100	0.100	0.095	0.089	0.089–0.100
	Median	0.095	0.097	0.094	0.089	0.089–0.097

**Tabla 4.** Porcentaje de área de distribución potencial (ADP) que cae en área no viable en cuestión de cambio de uso de suelo. WPP= considera como zona no viable las áreas en las que hay ciudades, cuerpos de agua, agricultura de riego y agricultura de temporal (con principio precautorio). WOPP= considera como zona no viable las ciudades, cuerpos de agua y agricultura de riego. La agricultura de temporal la considera viable para los mamíferos (sin principio precautorio).

Por primera vez, también presentamos un mapa de riqueza en el que se sobreponen las zonas de cambio de uso de suelo a futuro. De esta manera, es posible visibilizar, no solo las zonas con viabilidad climática, sino también las zonas con viabilidad en términos de uso de suelo (**Figura 4**).

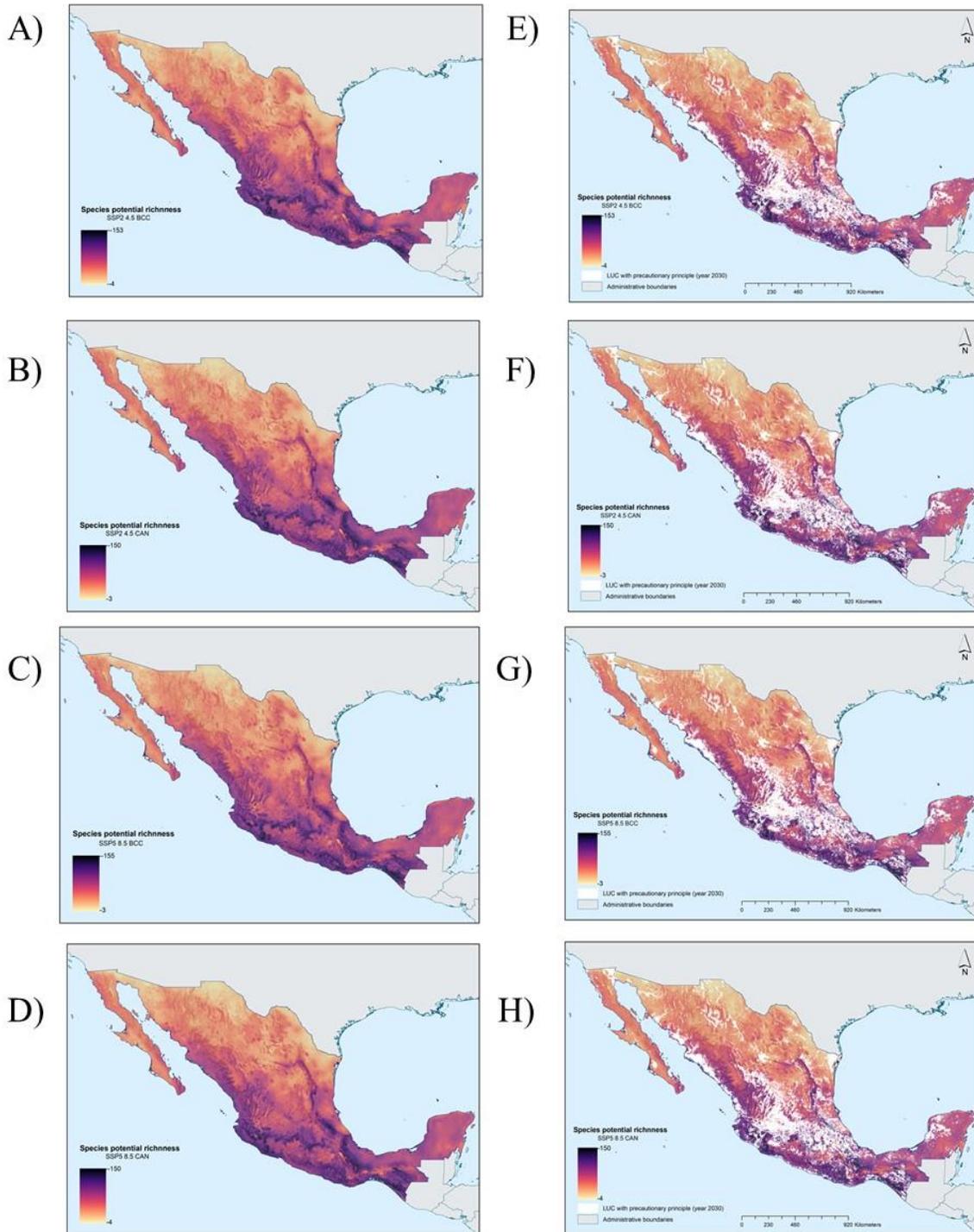
**Figura 3.** Riqueza potencial en el escenario con condiciones climáticas de 1970–2000. A) Mapa de idoneidad climática para la riqueza de especies y B) Mapa de idoneidad climática para la riqueza de especies tomando en cuenta cambio de uso de suelo con principio precautorio (las zonas agrícolas de temporal no son aptas para las poblaciones de mamíferos).

# Present



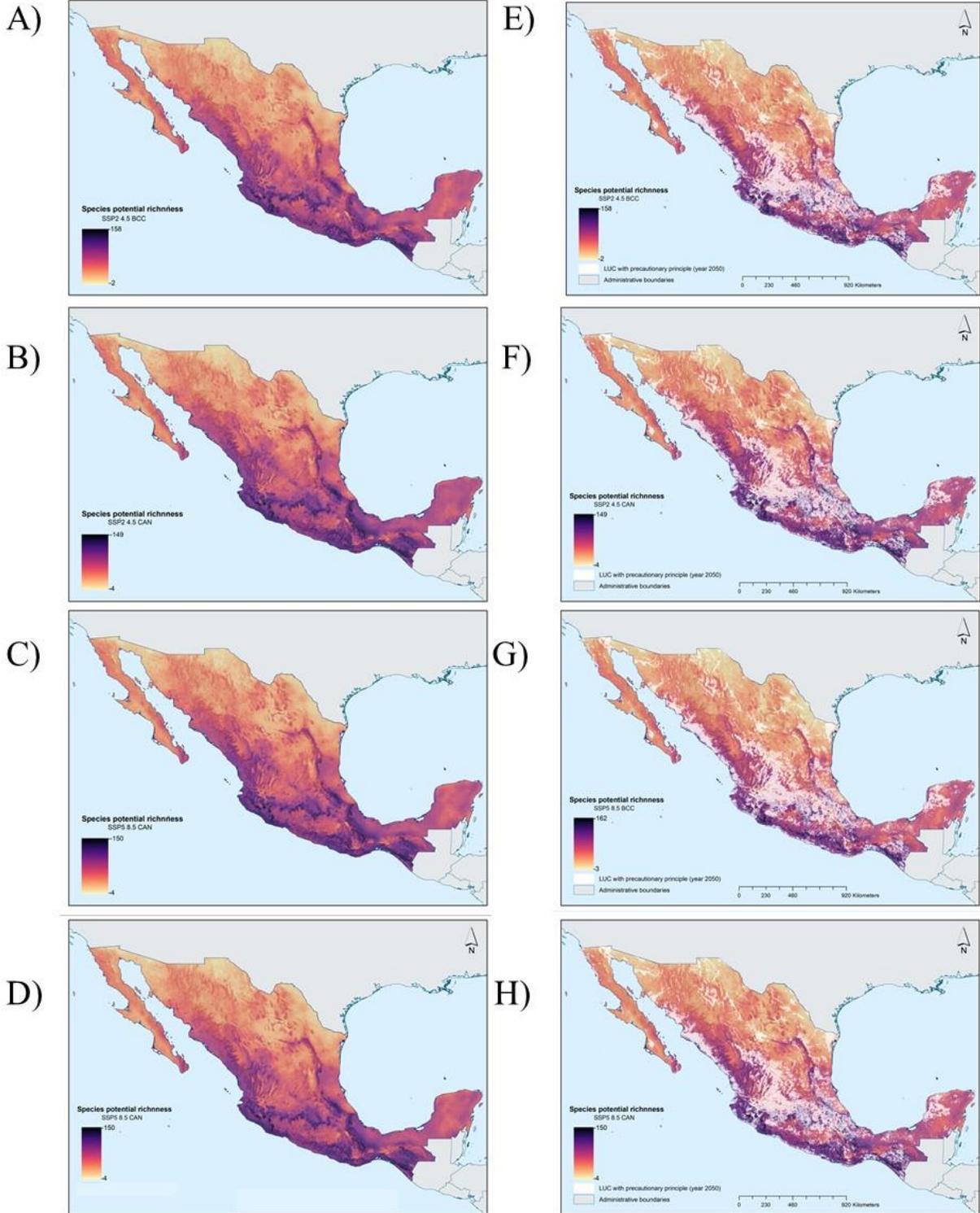
**Figura 4.** Mapas de riqueza de distribución potencial en contrastantes escenarios de cambio climático y modelos de circulación general en tres tiempos: 1) 2030 (2021–2040), 2) 2050 (2041–2060) and 3) 2070 (2081–2100) con y sin principio precautorio. A-D: Sin cambio de uso de suelo, E-H: con cambio de uso de suelo.

2030



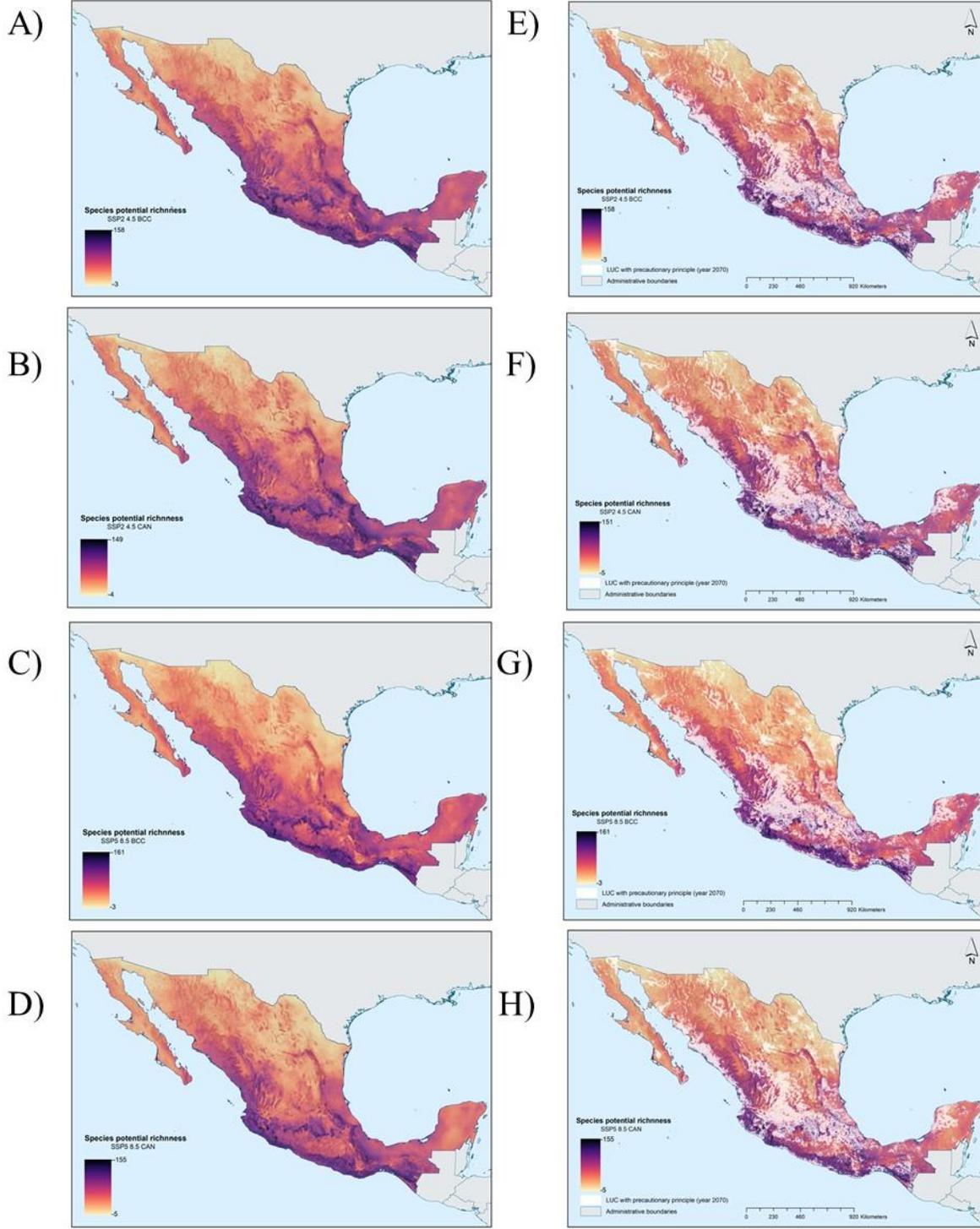
2)

# 2050



3)

# 2070

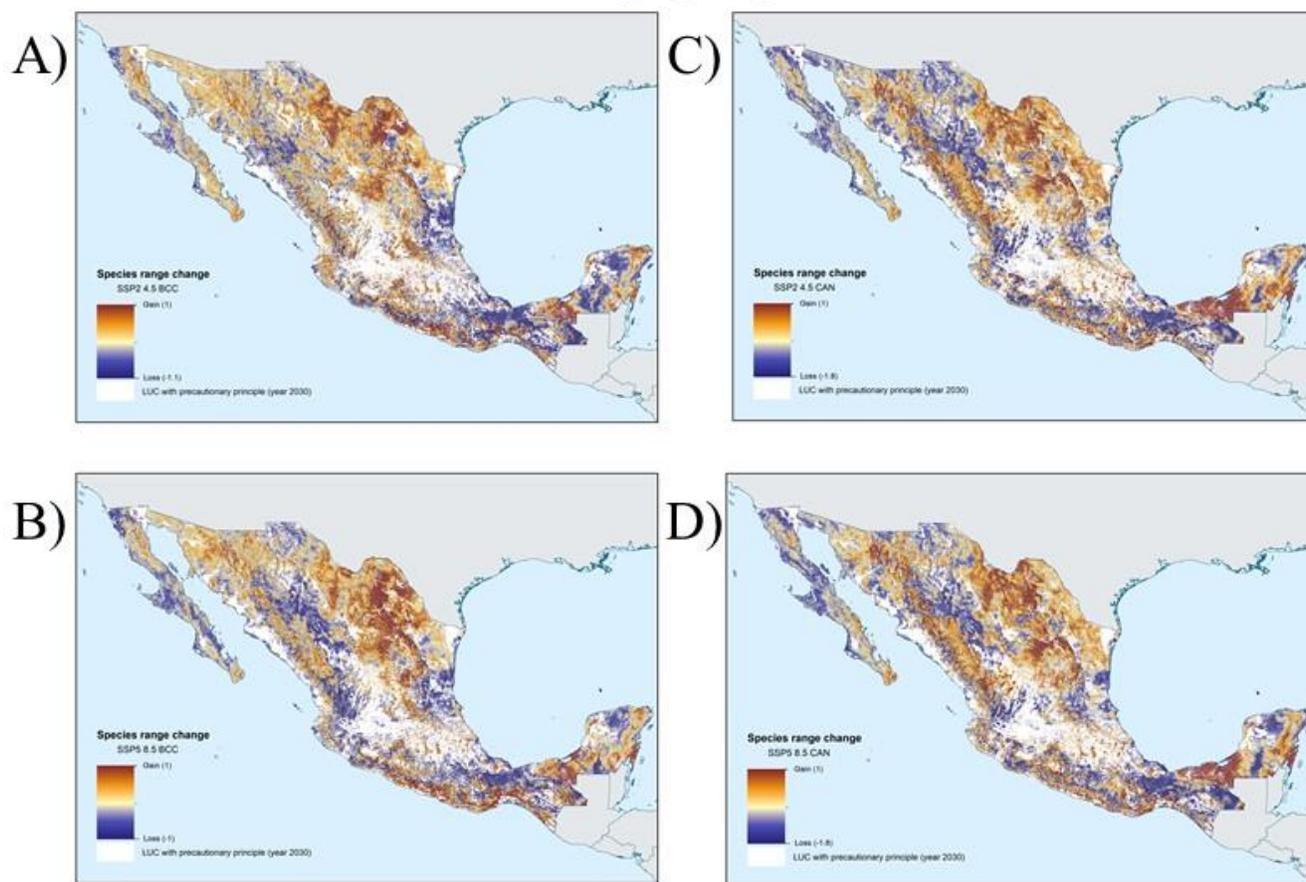


En cuanto a pérdidas de diversidad, notamos que las zonas geográficas en México que presentan mayores pérdidas potenciales de ADP de especies, están distribuidas en varias partes del territorio nacional. Se observan, por ejemplo, pérdidas importantes en ambas penínsulas y en las zonas en las que se mostraba alta riqueza. En donde hay un mayor número de especies, también es de esperarse que, a pesar de que siga habiendo un mayor número de especies a futuro en comparación con otras zonas, también sea una zona de mayor pérdida (Figura 5).

**Figura 5.** Zonas geográficas con mayor número de especies que pierden área de distribución potencial (ADP) en el futuro bajo tres tiempos: 1) 2030 (2021–2040), 2) 2050 (2041–2060) y 3) 2070 (2081–100).

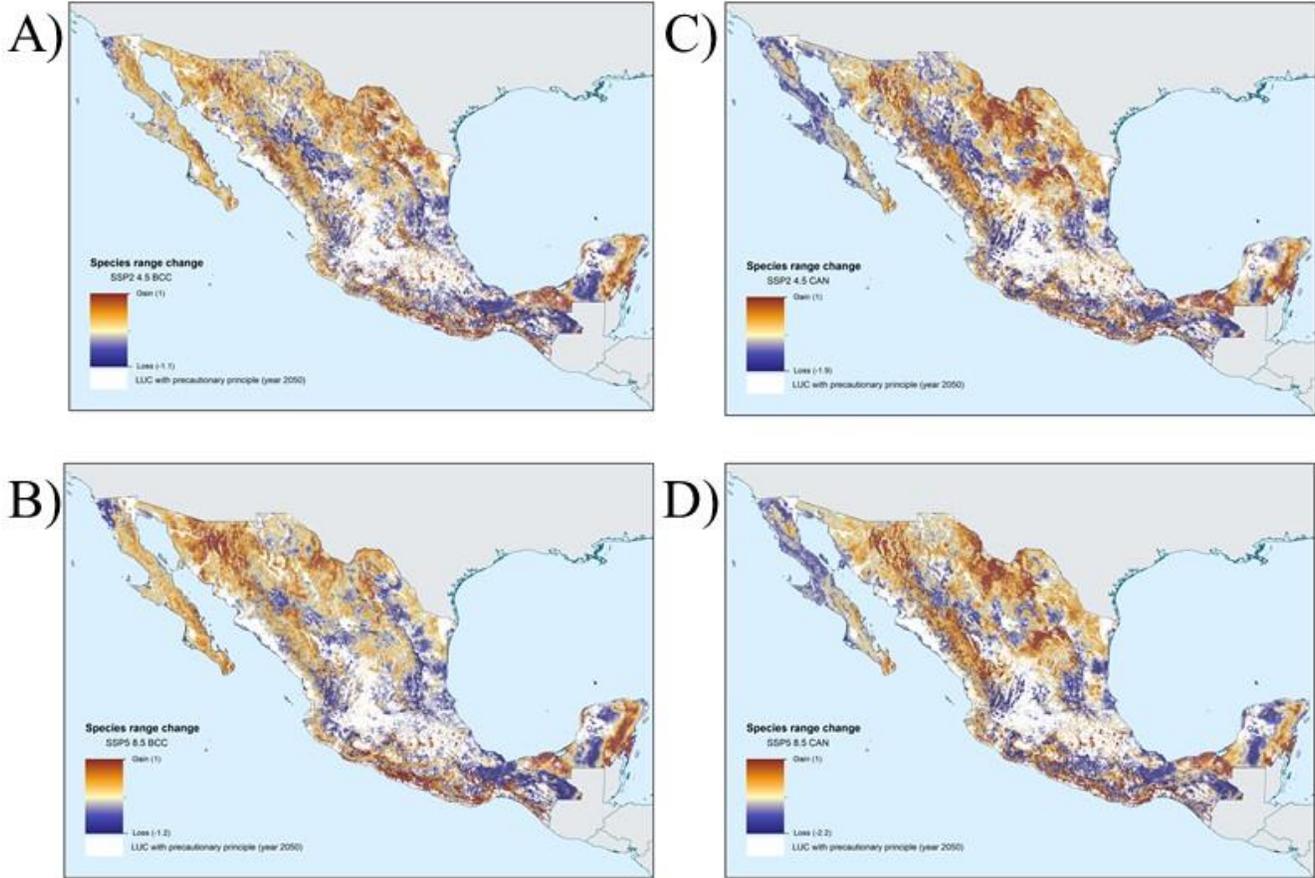
1)

# 2030



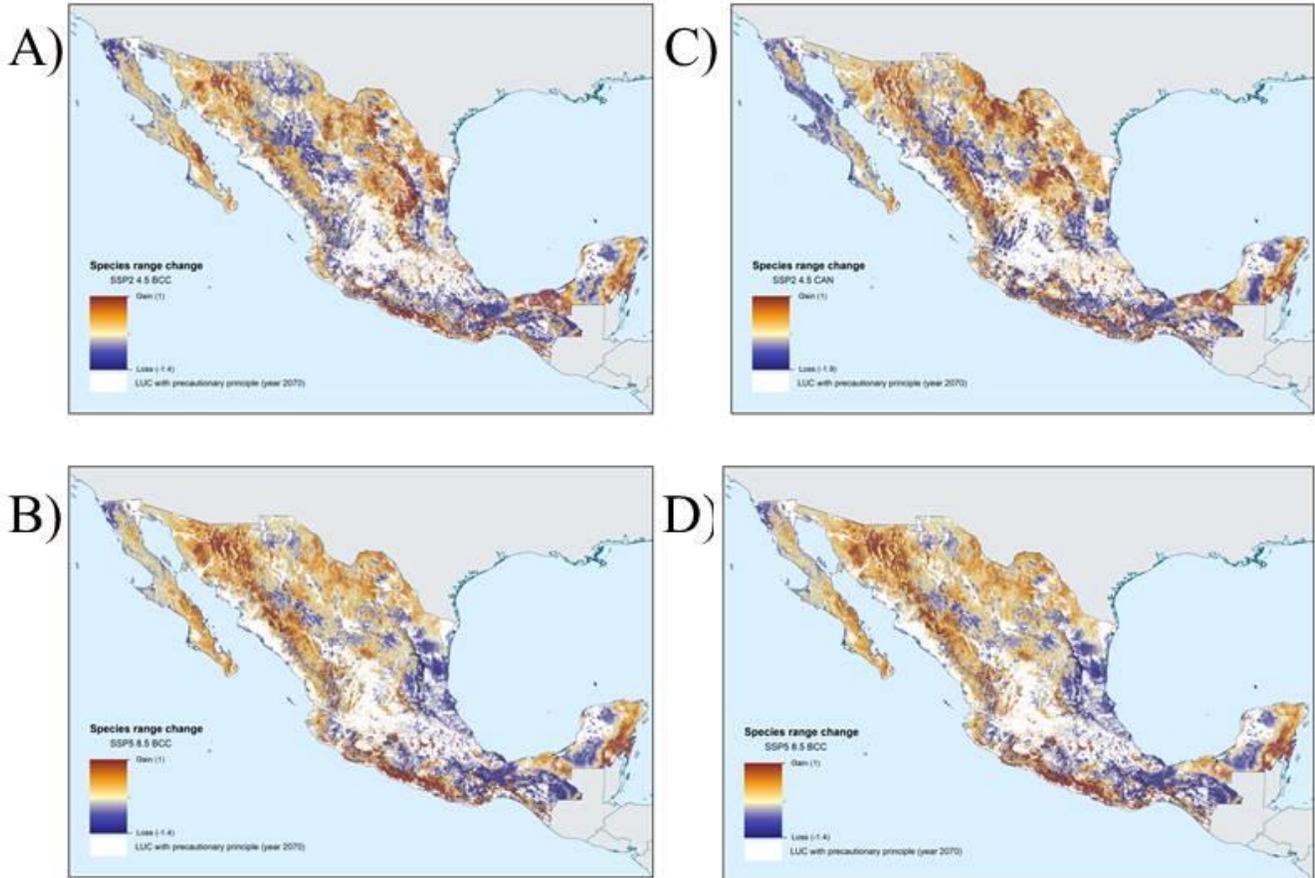
2)

# 2050



3)

# 2070



## Conclusiones generales

- El índice de riesgo ante condiciones de cambio climático propuesto, proporciona información con sentido biológico por lo que considera que puede ser útil su implementación en otros grupos de organismos. Dados los vacíos de conocimiento biológico, difícilmente será posible evaluar a todas las especies de un grupo, pero el poco conocimiento de una especie también nos alerta sobre la importancia de generar conocimiento de esa especie en particular.
- Las zonas de alta riqueza potencial están vinculadas con las zonas montañosas. En los escenarios evaluados, estas zonas permanecen en sitios geográficos similares, pero se ven reducidas hasta en un 37% (mediana).
- Este es el primer trabajo que permite visualizar un mapa de riqueza en el que se incorpora el cambio de uso de suelo. Si se toma en cuenta ambos factores, es más fácil identificar las zonas con el potencial climático y la viabilidad en cuestión de uso de suelo de las especies.
- Entre los grupos de especies en mayor riesgo se encuentran el orden Carnivora y Artiodactyla; así como las especies de tamaño mediano grande y grande. Estas especies tienen un importante impacto sobre las comunidades biológicas, por lo que es importante garantizar la conservación de suficiente área para su protección.

## Referencias

- Alhajeri, B. H. and Y. Fourcade. 2019. High correlation between species-level environmental data estimates extracted from IUCN expert range maps and from GBIF occurrence data. *Journal of Biogeography* **46**:1329-1341.
- Aubin, I., A. Munson, F. Cardou, P. Burton, N. Isabel, J. Pedlar, A. Paquette, A. Taylor, S. Delagrangé, and H. Kebli. 2016. Traits to stay, traits to move: a review of functional traits to assess sensitivity and adaptive capacity of temperate and boreal trees to climate change. *Environmental Reviews* **24**:164-186.
- Barbet-Massin, M., F. Jiguet, C. H. Albert, and W. Thuiller. 2012. Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods in ecology and evolution* **3**:327-338.
- Bennett, J. R., R. Maloney, and H. P. Possingham. 2015. Biodiversity gains from efficient use of private sponsorship for flagship species conservation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **282**:20142693.
- Bozinovic, F. and H. O. Pörtner. 2015. Physiological ecology meets climate change. *Ecology and evolution* **5**:1025-1030.
- Carbon Brief. 2018. Climate Modelling: Explainer: How ‘Shared Socioeconomic Pathways’ explore future climate change [online]. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change> [Accessed November 2020].
- CONABIO. 2020. Especies endémicas. Biodiversidad Mexicana Available at: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/endemicas/endemicas> [Accessed November 2020].
- CONANP. 2021. Natural Protected Areas. <https://www.gob.mx/conanp>.
- Conde, D. A., J. Staerk, F. Colchero, R. da Silva, J. Schöley, H. M. Baden, L. Jouvet, J. E. Fa, H. Syed, and E. Jongejans. 2019. Data gaps and opportunities for comparative and conservation biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116**:9658-9664.
- Duckworth, J. C., M. Kent, and P. M. Ramsay. 2000. Plant functional types: an alternative to taxonomic plant community description in biogeography? *Progress in Physical Geography* **24**:515-542.
- Fick, S. E. and R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* **37**:4302-4315.
- Field, C. B., M. Van Aalst, W. N. Adger, D. Arent, J. Barnett, R. Betts, E. Bilir, J. Birkmann, J. Carmin, and D. Chadee. 2014. Part A: Global and Sectoral Aspects: Volume 1, Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pages 1-1101 *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. IPCC*.
- Foden, W. B., G. M. Mace, J.-C. Vié, A. Angulo, S. H. Butchart, L. DeVantier, H. T. Dublin, A. Gutsche, S. Stuart, and E. Turak. 2009. Species susceptibility to climate change impacts. *Wildlife in a changing world—an analysis of the 2008 IUCN Red List of threatened species* **77**.
- Foden, W. B. and B. E. Young. 2016. IUCN SSC guidelines for assessing species' vulnerability to climate change. IUCN Cambridge, England and Gland, Switzerland.
- GRDP. 2021. Global Risk Data Platform. <https://preview.grid.unep.ch/> [Accessed February 2021].
- Hagger, V., D. Fisher, S. Schmidt, and S. Blomberg. 2013. Assessing the vulnerability of an assemblage of subtropical rainforest vertebrate species to climate change in south-east Queensland. *Austral Ecology* **38**:465-475.
- Jones, M. C. and W. W. Cheung. 2018. Using fuzzy logic to determine the vulnerability of marine species to climate change. *Global change biology* **24**:e719-e731.
- Joseph, L. N., R. F. Maloney, and H. P. Possingham. 2009. Optimal allocation of resources among threatened species: a project prioritization protocol. *Conservation biology* **23**:328-338.
- Keith, D. A., M. Mahony, H. Hines, J. Elith, T. J. Regan, J. B. Baumgartner, D. Hunter, G. W. Heard, N. J. Mitchell, and K. M. Parris. 2014. Detecting extinction risk from climate change by IUCN Red List criteria. *Conservation biology* **28**:810-819.
- McCarthy, M. A., C. J. Thompson, and S. T. Garnett. 2008. Optimal investment in conservation of species. *Journal of Applied Ecology* **45**:1428-1435.

- Memmott, J., P. G. Craze, N. M. Waser, and M. V. Price. 2007. Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology letters* **10**:710-717.
- Mendoza-Ponce, A., R. Corona-Núñez, F. Kraxner, S. Leduc, and P. Patrizio. 2018. Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change* **53**:12-23.
- NASA. 2021. Fire Information for Resource Management System. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> [Accessed February 2021].
- Oliver, T. H. and M. D. Morecroft. 2014. Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* **5**:317-335.
- Pacifici, M., P. Visconti, and C. Rondinini. 2018. A framework for the identification of hotspots of climate change risk for mammals. *Global change biology* **24**:1626-1636.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura, and A. Townsend Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* **34**:102-117.
- Pekin, B. K. and B. C. Pijanowski. 2012. Global land use intensity and the endangerment status of mammal species. *Diversity and Distributions* **18**:909-918.
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura, and M. B. Araújo. 2011. *Ecological niches and geographic distributions (MPB-49)*. Princeton University Press.
- Pounds, J. A., M. R. Bustamante, L. A. Coloma, J. A. Consuegra, M. P. Fogden, P. N. Foster, E. La Marca, K. L. Masters, A. Merino-Viteri, and R. Puschendorf. 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* **439**:161-167.
- Ramírez-Barrón, G.M. Evaluación de la vulnerabilidad de mamíferos enlistados como prioritarios ante condiciones de cambio climático. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Riojas-López, M. E., E. Mellink, and J. Luévano. 2018. A semiarid fruit agroecosystem as a conservation-friendly option for small mammals in an anthropized landscape in Mexico. *Ecological Applications* **28**:495-507.
- Rosenfeld, J. S. 2002. Functional redundancy in ecology and conservation. *Oikos* **98**:156-162.
- Sandin, L., A. Schmidt-Kloiber, J.-C. Svenning, E. Jeppesen, and N. Friberg. 2014. A trait-based approach to assess climate change sensitivity of freshwater invertebrates across Swedish ecoregions. *Current Zoology* **60**:221-232.
- Santini, L., T. Cornulier, J. M. Bullock, S. C. Palmer, S. M. White, J. A. Hodgson, G. Bocedi, and J. M. Travis. 2016. A trait-based approach for predicting species responses to environmental change from sparse data: how well might terrestrial mammals track climate change? *Global change biology* **22**:2415-2424.
- Schloss, C. A., T. A. Nuñez, and J. J. Lawler. 2012. Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109**:8606-8611.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental– Especies nativas de México de flora y fauna silvestres– Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio– Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación 30 diciembre.
- Shepherd, T. G., E. Boyd, R. A. Calel, S. C. Chapman, S. Dessai, I. M. Dima-West, H. J. Fowler, R. James, D. Maraun, and O. Martius. 2018. Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic change* **151**:555-571.
- SNIB. 2020. [www.snib.mx](http://www.snib.mx).
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, and H. Miller. 2007. IPCC fourth assessment report (AR4). *Climate change* **374**.
- Stanton, J. C., K. T. Shoemaker, R. G. Pearson, and H. R. Akçakaya. 2015. Warning times for species extinctions due to climate change. *Global change biology* **21**:1066-1077.
- Thuiller, W., B. Lafourcade, R. Engler, and M. B. Araújo. 2009. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* **32**:369-373.
- Trejo, I., E. Martínez-Meyer, E. Calixto-Pérez, S. Sánchez-Colón, R. Vázquez De La Torre, and L. Villers-Ruiz. 2011. Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México. *Atmósfera* **24**:1-14.

- Ureta, C., C. Martorell, Á. P. Cuervo-Robayo, M. C. Mandujano, and E. Martínez-Meyer. 2018. Inferring space from time: On the relationship between demography and environmental suitability in the desert plant *O. rastrera*. *PloS one* **13**:e0201543.
- Ureta, C., C. Martorell, J. Hortal, and J. Forni. 2012. Assessing extinction risks under the combined effects of climate change and human disturbance through the analysis of life-history plasticity. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **14**:393-401.
- Velasco, J. A., F. Estrada, O. Calderón-Bustamante, D. Swingedouw, C. Ureta, C. Gay, and D. Defrance. 2021. Synergistic impacts of global warming and thermohaline circulation collapse on amphibians. *Communications biology* **4**:1-7.
- Young, B., E. Byers, K. Gravuer, K. Hall, G. Hammerson, and A. Redder. 2011. Guidelines for using the NatureServe climate change vulnerability index. . NatureServe, Arlington, Virginia, USA.