

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD
ACTUAL Y FUTURA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA
BIODIVERSIDAD EN MÉXICO: EL CASO DE LAS ESPECIES ENDÉMICAS,
PRIORITARIAS Y EN RIESGO DE EXTINCIÓN

Informe final

2017

ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Coordinado por:

Coordinación General de Adaptación
al Cambio Climático

Elaborado por:

Instituto de Biología, UNAM

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col.
Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.p. 4210
Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.

www.inecc.gob.mx



Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático

“Propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático de la biodiversidad en México: el caso de las especies endémicas, prioritarias y en riesgo de extinción”

Informe final de proyecto que presenta:

Dr. Víctor Manuel G. Sánchez-Cordero Dávila

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica Departamento de Zoología
Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México

Informe final

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 21 de noviembre de 2017

CONTENIDO

1	Introducción	3
2	Objetivos	4
2.1	Principal	4
2.2	Específicos	4
3	Actividades	4
3.1	Búsqueda de literatura y revisión de cómo se ha abordado la evaluación de la sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa, para el análisis de la vulnerabilidad de la biodiversidad, en el contexto de cambio climático	4
3.1.1	Selección de criterios de búsqueda de literatura y depuración	4
3.1.2	Análisis de literatura y categorización	5
3.2	Análisis de conceptos y metodologías de las tres dimensiones de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa) a nivel institucional	5
3.3	Especies endémicas, prioritarias y en riesgo de extinción consideradas en el análisis	6
3.4	Variables que describen: exposición, sensibilidad de las especies endémicas, prioritarias y en riesgo, y capacidad adaptativa, actual y bajo escenarios de cambio climático	7
3.5	Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad actual y futura bajo escenarios de cambio climático	7
3.5.1	Sensibilidad	8
3.5.2	Exposición.	11
3.5.3	Capacidad adaptativa.	12
3.5.4	Vulnerabilidad	13
4	Productos elaborados	14
4.1	Revisión de literatura especializada	14
4.2	Conceptos y metodologías de las tres dimensiones de vulnerabilidad a nivel institucional	18
4.3	Definición de criterios y selección de especies endémicas, prioritarias y en riesgo de extinción	21
4.4	Determinación de variables para describir exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa	26
4.4.1	Sensibilidad.	26
4.4.2	Exposición.	27
4.4.3	Capacidad adaptativa	30
5	Ejemplificación de propuesta metodológica aplicada a un grupo selecto de especies prioritarias, endémicas y en riesgo.	31
6	Conclusión y recomendaciones	44
7	Literatura citada	46

1 INTRODUCCIÓN

La influencia de las actividades antropogénicas en las anomalías de los promedios de los parámetros meteorológicos ha sido clara, ocasionando el aumento en el nivel de los mares, la disminución de la cobertura de hielo y nieve, y el calentamiento del océano y la atmósfera (IPCC, 2014). En este contexto, se han considerado a nivel internacional los principales efectos adversos originados por el cambio climático, tanto la capacidad de resiliencia de los sistemas naturales, el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos y la salud humana (CMNUCC, 1992); así como la importancia de generar respuestas ante dicha problemática bajo la consideración de la incertidumbre científica (*op. cit.*), es decir, el principio precautorio (Cooney, 2004).

Con la finalidad de hacer frente a la vulnerabilidad y riesgos que implica dicha problemática, México estableció la Ley General de Cambio Climático como marco jurídico a nivel nacional (DOF, 2016), el Sistema Nacional de Cambio Climático como marco institucional y la Estrategia Nacional de Cambio Climático como instrumento de planeación (DOF, 2013).

En este contexto, se establece como prioritario identificar la vulnerabilidad actual y ante el cambio climático, bajo los componentes de sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa, con el fin de implementar estrategias que permitan la toma de decisiones para lograr la adaptación de los ecosistemas, comunidades, especies y su hábitat (Bagne *et al.*, 2014; DOF, 2016).

El impacto del cambio climático en la diversidad biológica ha sido reportado en diversos estudios, indicando cambios en la ecología, fenología y patrones de distribución de las especies, principalmente para vertebrados terrestres (Parmesan, 2006; Feria *et al.*, 2013; Botello *et al.*, en revisión). No obstante, los análisis desde el punto de vista del modelado de distribución de especies y la evaluación de la afectación, magnitud y velocidad en la que varía el clima (exposición), la sensibilidad y la habilidad de adaptación ante nuevas condiciones (capacidad adaptativa inherente), han sido escasos.

Los estudios más recientes (Foden *et al.*, 2013; Hagger *et al.*, 2013; Mamauag *et al.*, 2013; Scheffers *et al.*, 2013; Bagne *et al.*, 2014; Barrows *et al.*, 2014; Bush *et al.*, 2014; Eguiguren-Velpucha *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2016; Reside *et al.*, 2016; Ribero *et al.*, 2016; Razgour *et al.*, 2017) se han realizado en regiones particulares y con enfoque multitaxón, pero pocos han implementado un marco metodológico para evaluar los tres componentes de la vulnerabilidad y proveer información a nivel nacional que permita identificar las regiones de mayor riesgo para aquellas especies que actualmente se encuentran en riesgo.

En este sentido, el presente trabajo constituye una propuesta para calcular la vulnerabilidad de las especies ante el cambio climático, facilitando el proceso previo a la toma de decisiones para la implementación de acciones de conservación, adaptación y mitigación. Para ello, se empleó el marco teórico de la vulnerabilidad propuesto por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2007), considerando la exposición como la magnitud, carácter y velocidad de las variaciones climáticas que afectan un sistema; la sensibilidad como las características del sistema por las que podría afectarse ante el cambio climático; y la capacidad adaptativa como aquellos

recursos, capital humano e instrumentos que representan una mayor posibilidad de adaptación. Asimismo, se consideró el marco conceptual del modelado de distribución actual (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005).

2 OBJETIVOS

2.1 PRINCIPAL

Proponer un método para evaluar la vulnerabilidad, presente y futura bajo escenarios e cambio climático, aplicada a la biodiversidad, particularmente a especies endémicas, prioritarias y en riesgo.

2.2 ESPECÍFICOS

- a. Establecer método para evaluar la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa, tanto actuales como futuras, de las especies endémicas, prioritarias y en riesgo, seleccionadas para este estudio, con base en la información disponible para México.
- b. Definir la o las escalas geográficas que reflejen de manera apropiada la propuesta de vulnerabilidad.
- c. Determinar el nivel de análisis de acuerdo con la información disponible para México (municipios, biomas, tipos de vegetación, entre otros)

3 ACTIVIDADES

3.1 BÚSQUEDA DE LITERATURA Y REVISIÓN DE CÓMO SE HA ABORDADO LA EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD, EXPOSICIÓN Y CAPACIDAD ADAPTATIVA, PARA EL ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LA BIODIVERSIDAD, EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

3.1.1 Selección de criterios de búsqueda de literatura y depuración

Se realizó una revisión sistematizada de artículos científicos y capítulos de libros publicados entre los años 2013 y el primer semestre de 2017 en el buscador Scopus, cuyo contenido se restringe a literatura revisada por pares. Dichas fechas fueron consideradas con base en la fecha de publicación del último informe (AR5) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), quienes, siendo un órgano científico, presentan las contribuciones actualizadas a nivel internacional sobre los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, así como sus causas repercusiones y estrategias de respuesta (http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml).

Como primer criterio de búsqueda, se seleccionaron aquellos artículos que en el título, resumen y palabra clave contenían los siguientes criterios:

- a) climate change AND biodiversity AND exposure
- b) climate change AND biodiversity AND sensitivity
- c) climate change AND biodiversity AND adaptive capacity
- d) climate change AND biodiversity AND vulnerability
- e) biodiversity AND exposure AND sensitivity AND adaptive capacity

La literatura coincidente con los criterios establecidos y que abordó explícitamente la evaluación de la vulnerabilidad en general y/o cualquiera de sus tres dimensiones, fue seleccionada como adecuada para el análisis, descartando aquella donde el tipo de documento correspondía a una revisión, crítica o resumen de conferencia, así como las que evaluaron agroecosistemas, aspectos sociales como salud, seguridad alimentaria o bien, únicamente mencionaron el contexto del clima cambiante y la vulnerabilidad de especies sin abordar un caso de estudio.

3.1.2 Análisis de literatura y categorización

A partir de la revisión y depuración previa, se elaboró una base de datos general donde se incluyeron el total de resultados obtenidos para identificar aquellos artículos coincidentes en más de una búsqueda, determinando como prioritarios los que se encontraron en las cinco búsquedas. Posteriormente, se seleccionaron 60 artículos al azar para crear combinaciones de palabras clave que la categorización de la literatura, las cuales fueron las siguientes: “climate change”, “framework”, “vulnerability”, “models”, “sensitivity”, “indicator”, “resilience”, “adaptive capacity”, “exposure”, “local assessment”, “treatment”, “conservation”, “biodiversity”, “adaptation” y “mitigation”.

Se establecieron cinco categorías de clasificación basadas en la dimensión de vulnerabilidad evaluada, el método empleado, el tipo de producto obtenido (marco de evaluación), la aplicación y objeto de estudio.

3.2 ANÁLISIS DE CONCEPTOS Y METODOLOGÍAS DE LAS TRES DIMENSIONES DE VULNERABILIDAD (EXPOSICIÓN, SENSIBILIDAD Y CAPACIDAD ADAPTATIVA) A NIVEL INSTITUCIONAL

Se realizó un análisis de conceptos y propuestas metodológicas específicas de las principales organizaciones involucradas a nivel nacional en el tema de cambio climático y la vulnerabilidad de los ecosistemas, obteniendo los conceptos y propuestas metodológicas de evaluación de las siguientes instituciones: el Instituto de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), la Comisión para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Instituto de Geografía de la UNAM (IG), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS). También se revisaron las aproximaciones abordadas por instituciones internacionales como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés),

la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional para el Desarrollo (GIZ) y el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

3.3 ESPECIES ENDÉMICAS, PRIORITARIAS Y EN RIESGO DE EXTINCIÓN CONSIDERADAS EN EL ANÁLISIS

Se obtuvo la lista de especies incluidas en alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010) y como especies y poblaciones prioritarias para la conservación (DOF, 2014). Se seleccionó un grupo de especies terrestres del territorio continental que, de acuerdo a dichos documentos, tienen una distribución endémica al país y se encuentran en las categorías de riesgo de amenazada (A), en peligro de extinción (P) o en protección especial (Pr), así como todas las especies no consideradas bajo los criterios anteriores, pero sí catalogadas como prioritarias para la conservación en el Diario Oficial de la Federación DOF: 05/03/2014.

La lista inicial de especies se sometió a un proceso de depuración automatizado para asegurar la calidad de los datos. Posteriormente, se realizó una revisión manual para identificar datos de calidad dudosa no detectados durante el proceso automático.

1. Se buscaron ocurrencias georreferenciadas para México de las especies seleccionadas en el repositorio de Global Biodiversity Information Facility (GBIF), para el periodo 1900-2017.
2. Para cada especie se eliminaron las ocurrencias correspondientes a registros fósiles, especímenes vivos, provenientes de iNaturalist y aquellos sin coordenadas geográficas.
3. Se eliminaron las especies con menos de 10 ocurrencias.
4. Se realizó una revisión para eliminar las ocurrencias que estuvieran localizadas fuera de México continental, con datos faltantes para los predictores y aquellas donde había más de un registro de la misma especie por celda.
5. Se hizo un segundo filtro para eliminar las especies con menos de 10 ocurrencias.
6. Se realizó un análisis de detección de valores atípicos en el espacio ambiental y se eliminaron aquellas ocurrencias con esta característica.
7. Se hizo un tercer filtro para eliminar las especies con menos de 10 ocurrencias.
8. Se identificaron y eliminaron de forma manual ocurrencias evidentemente fuera del rango de distribución de la especie en particular.
9. Para tener una adecuada representación taxonómica, se seleccionó una especie por género del listado de aquellas que cumplieron con los criterios anteriores y en caso de que existiera un género con más de 10 especies, se tomó el 10% como representativo.

3.4 VARIABLES QUE DESCRIBEN: EXPOSICIÓN, SENSIBILIDAD DE LAS ESPECIES ENDÉMICAS, PRIORITARIAS Y EN RIESGO, Y CAPACIDAD ADAPTATIVA, ACTUAL Y BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Con base en la revisión de literatura especializada, una búsqueda en Google de documentos de las instituciones seleccionadas que contenían un glosario, y mediante una reunión llevada a cabo el día 25 de julio del presente año con el grupo de trabajo del INECC, se definieron los indicadores e índices que permitieron analizar y describir la vulnerabilidad actual y futura bajo escenarios de cambio climático.

3.5 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACTUAL Y FUTURA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

De acuerdo a lo establecido en los términos de referencia, el marco conceptual para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático (IPCC, 2007) se apega a la fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

A partir de la lista final de especies se calcularon la sensibilidad y la exposición para cada especie. La capacidad adaptativa se define como los recursos, instrumentos, capital humano e institucional que permiten detonar procesos de adaptación para la reducción de la vulnerabilidad (CGACC, basadas en IPCC, 2007); ya que no considera características intrínsecas de las especies, ésta se calculó de forma general considerando algunos instrumentos de conservación de diversidad biológica establecidos en el país.

Por otro lado, la definición de exposición dentro del marco conceptual utilizado en el presente estudio, y en la mayoría de los métodos revisados para evaluar la vulnerabilidad de especies, implica un cambio en las condiciones climáticas con respecto a un tiempo 0. En sentido estricto, una vulnerabilidad actual, en yuxtaposición con una futura, implica conocer el cambio en las variables climáticas actuales (tiempo 0) con respecto a las presentes en un tiempo anterior (tiempo -1). Debido a la complejidad de este tipo de análisis y la incompatibilidad conceptual asociada al resto de variables propuestas, el método descrito intenta representar la vulnerabilidad de las especies de acuerdo a su distribución actual, con respecto a los diferentes escenarios de cambio climático.

Todos los análisis se realizaron en el lenguaje de programación estadístico R (R Core Team, 2014). La justificación de la selección de las variables consideradas se describe en la sección 4.4.

3.5.1 Sensibilidad

Las variables consideradas para el cálculo de la sensibilidad son: a) el tamaño del área de distribución, b) la especificidad de hábitat y c) las zonas características donde se encuentra la especie.

Tamaño del área de distribución. Se calculó a partir de la proyección al espacio geográfico del modelo de idoneidad climática del nicho ecológico generado por el algoritmo MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006). Mediante una sobreposición cartográfica se identificaron los diferentes tipos de vegetación natural y ecorregiones nivel IV en las que hay ocurrencias. Se seleccionaron los polígonos que delimitan las ecorregiones con ocurrencias y se generó una zona de amortiguamiento de 0.5° alrededor de éstos para ser usado como plantilla de corte, equivalente a *m sensu* Soberón y Peterson (2005). Como predictores se utilizaron las 19 variables bioclimáticas (~1 km²) de WorldClim 2.0 (Hijmans *et al.*, 2005), de las que se extrajeron los valores mediante la plantilla de corte y se realizó un análisis para excluir aquellas con una correlación $r > 0.7$, con el fin de optimizar el poder de cómputo y evitar posibles problemas de multicolinealidad (Venette, 2017).

Los modelos se generaron mediante la librería ENMeval (Muscarella *et al.*, 2014). Aunque comúnmente se clasifica a MaxEnt como un algoritmo de solo presencias, en realidad necesita generar puntos “background” para muestrear los valores de los predictores dentro del área delimitada; se estableció la selección de 10,000 puntos *background* dentro de la plantilla de corte para parametrizar el modelo. Los datos de presencias se dividieron en grupos de entrenamiento y prueba mediante el método de bloque. Este es un método geográficamente estructurado que divide las ocurrencias y los puntos *background* en cuatro bloques de igual tamaño de acuerdo su posición con respecto a las líneas de latitud y longitud, para reducir la autocorrelación espacial y el sesgo en el muestreo (Hijmans, 2012). Para ajustar los modelos maximizando la capacidad predictiva y evitar el sobreajuste, ENMeval permite ajustar los multiplicadores de regularización (*regularization multiplier*) y las clases de características (*feature classes*), que determinan la penalización por agregar parámetros al modelo y la forma potencial de las curvas de respuesta respectivamente (Muscarella *et al.*, 2014). Se establecieron cinco *regularization multiplier* y 13 *feature classes* a partir de los cuales se generaron 65 modelos para cada especie. De estos modelos se seleccionó el mejor de acuerdo a la tasa de omisión y al Área Bajo la Curva (AUC).

Los modelos se proyectaron al espacio geográfico delimitado por la plantilla de corte. Comúnmente los algoritmos arrojan dos tipos de salidas: a) continuas, donde cada sitio tiene una probabilidad de ser parte de la distribución o representa la idoneidad para la especie y b) discretas, donde los sitios se clasifican como dentro o fuera de la distribución de la especie (Liu *et al.*, 2011). Para transformar las proyecciones continuas de los modelos a mapas de discretos de presencia/ausencia es necesario seleccionar un umbral específico (Liu *et al.*, 2005). El umbral utilizado corresponde al máximo valor de la suma de la sensibilidad y especificidad.

Las proyecciones discretas se transformaron a polígonos y, mediante una sobreposición cartográfica, se seleccionaron aquellos intersectados por vegetación natural, por ejemplo, aquellos diferentes a uso de suelo agrícola, acuícola, asentamientos humanos y zonas urbanas. Los polígonos resultantes representan el área de distribución potencial actual.

La especificidad de hábitat. Se calculó identificando los diferentes tipos de vegetación natural primaria y secundaria en los que hay ocurrencias de la especie.

Las zonas características donde se encuentra la especie. Corresponden al número de ecorregiones nivel IV en las que hay ocurrencias de la especie.

Se construyó una tabla con los valores de superficie de la distribución actual, la especificidad de hábitat y zonas características para todas las especies. Se dividió 1 entre los valores de las variables para reflejar el aporte negativo a la vulnerabilidad, por ejemplo, mientras mayor es el valor, menor es la sensibilidad. Ya que los valores se encuentran en escalas diferentes, se normalizaron mediante la fórmula:

$$xn = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

de tal manera que el rango de valores va de 0 a 1 para cada variable.

El polígono de distribución actual se transformó a formato raster, se asignaron los valores normalizados de las variables a capas diferentes y se sumaron para obtener un raster de sensibilidad para cada especie. Finalmente, se creó un mosaico mediante la suma de los rasters de cada especie para obtener un raster de sensibilidad general (figura 1).

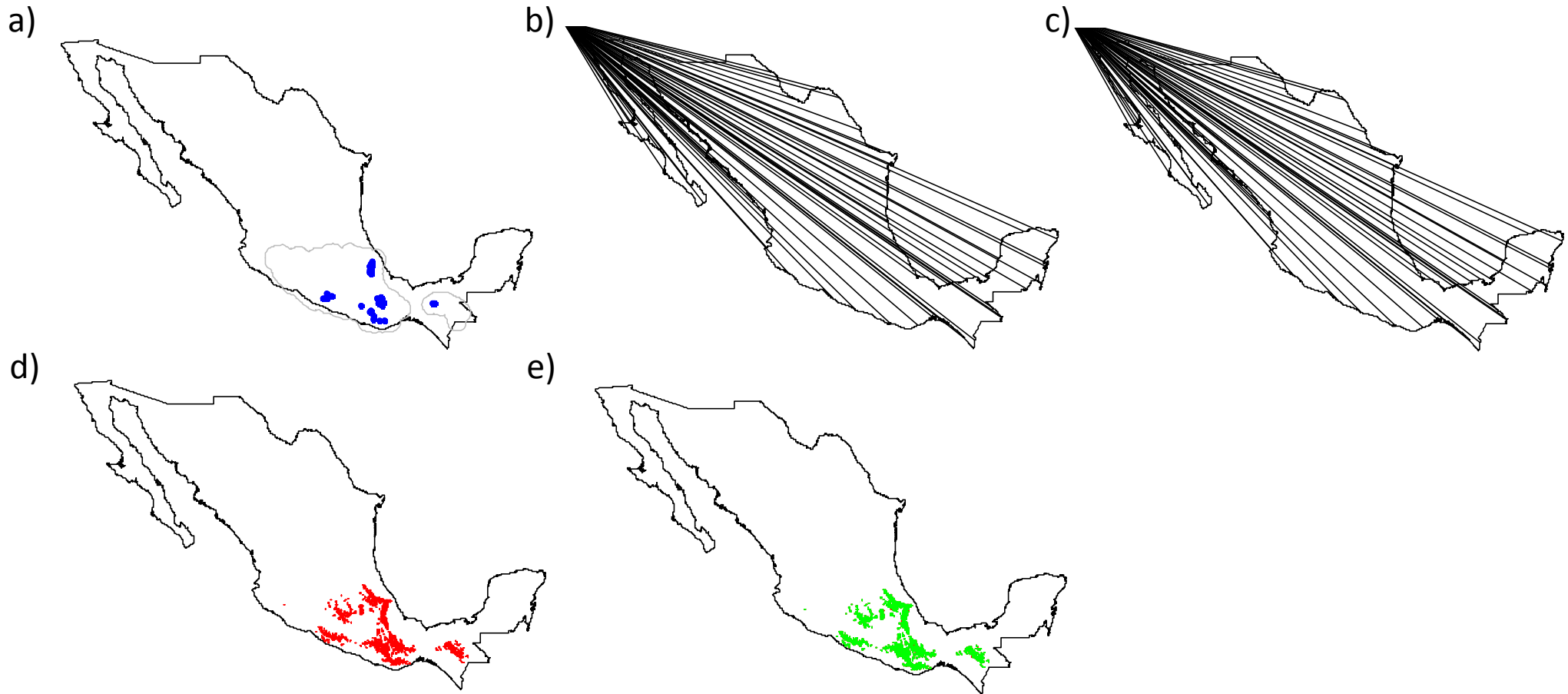


Figura 1. Proceso para determinar el área de distribución potencial actual. a) Ubicación de ocurrencias (en azul) y una zona de amortiguamiento de 0.5° alrededor de las ecorregiones nivel IV correspondientes; b) corte de predictores para calibrar el modelo de distribución; c) proyección al espacio geográfico del modelo de distribución; d) modelo de distribución discreto; e) modelo de distribución discreto eliminando la superficie correspondiente a uso de suelo agrícola, acuícola, asentamientos humanos y zonas urbanas.

3.5.2 Exposición.

La exposición se calculó mediante el método de detección de ambientes no análogos (Mesgaran *et al.*, 2014) implementado en la herramienta ExDet de la librería ecospat (Broennimann *et al.*, 2015). Se consideraron 12 escenarios de cambio climático conformados por tres modelos de circulación general: a) GFDL-CM3, b) HADGEM2-ES y c) MPI-ESM-LR, dos horizontes temporales: a) cercano y b) medio, y dos forzamientos radiativos: a) RCP 4.5 y b) RCP 8.5 (tabla 1).

Tabla 1. Escenarios considerados para calcularla vulnerabilidad. La codificación de cada escenario está dada por el método o entidad que genera el modelo: a) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), b) Hadley Global Environment Model 2 - Earth System (HADGEM2-ES) y c) Max Planck Institute for Meteorology (MPI); el forzamiento radiativo: a) 4.5 y b) 8.5; y el horizonte temporal: a) 2015-2039 (cercano) y b) 2045-2069 (medio).

No.	Escenario
1	GFDL_4.5_2015-2039
2	GFDL_4.5_2045-2069
3	GFDL_8.5_2015-2039
4	GFDL_8.5_2045-2069
5	HADGEM2_ES_4.5_2015-2039
6	HADGEM2_ES_4.5_2045-2069
7	HADGEM2_ES_8.5_2015-2039
8	HADGEM2_ES_8.5_2045-2069
9	MPI_ESM_4.5_2015-2039
10	MPI_ESM_4.5_2045-2069
11	MPI_ESM_8.5_2015-2039
12	MPI_ESM_8.5_2045-2069

Se calcularon las 19 variables bioclimáticas para los 12 escenarios mediante la librería dismo (Hijmans *et al.*, 2015) y se seleccionaron aquellas usadas para generar el modelo de idoneidad climática de cada especie, i.e. aquellas con correlación < 0.7 , para cada escenario. Se extrajeron los valores de las variables seleccionadas, de la climatología base actual y los 12 escenarios, correspondientes a los polígonos de distribución potencial actual. Utilizando la climatología base como referencia, se realizó el análisis de detección de ambientes no análogos para los 12 escenarios. El intervalo de los valores resultantes es: $]-\infty, +\infty[$; valores negativos indican condiciones ambientales no análogas univariadas, tales como los valores de alguna o algunas variables se encuentran fuera de rango de referencia. Valores de 0 a 1 indican condiciones similares y valores >1 indican condiciones no análogas multivariadas, es decir, nuevas combinaciones de los valores de las variables.

Los valores resultantes se transformaron a un formato raster; éste se reclasificó de manera que las celdas con condiciones no análogas toman un valor de 1 y aquellas con condiciones similares un valor de 0. El raster binario obtenido corresponde a la exposición a la que estará sometida la especie correspondiente. Se creó un mosaico sumando los rasters de exposición de todas las especies para cada uno de los 12 escenarios para obtener la misma cantidad de rasters de exposición general (figura 2).

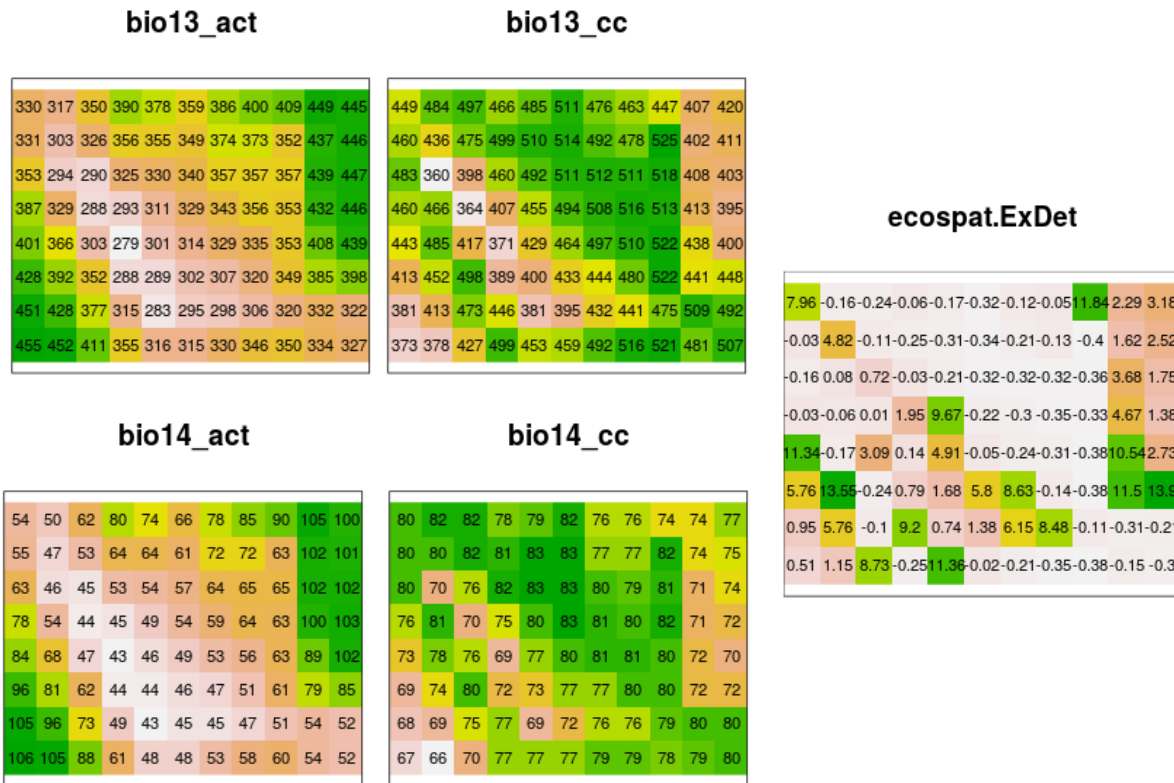


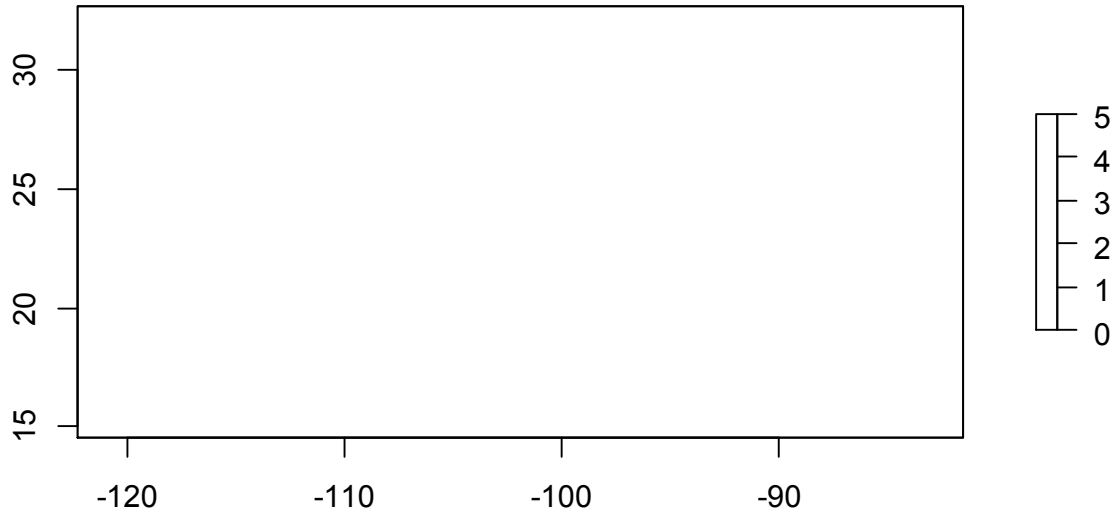
Figura 2. Ejemplo de cálculo de la exposición mediante el método de detección de ambientes no análogos con la herramienta ExDet; bio13 y bio14 representan los valores de las variables bioclimáticas: a) precipitación del mes más húmedo y b) del mes más seco respectivamente, actuales (_act) y bajo un escenario de cambio climático (_cc); ecospat.ExDet es el resultado rasterizado del análisis.

3.5.3 Capacidad adaptativa.

Se transformaron a formato raster los polígonos que delimitan los instrumentos de conservación: a) Áreas Naturales Protegidas federales, b) Áreas Naturales Protegidas estatales, c) Áreas Naturales Protegidas municipales, d) Regiones Terrestres Prioritarias, e) Regiones Hidrológicas Prioritarias, f) Humedales de Importancia Internacional y g) Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves. Se creó un mosaico sumando los valores de los rastres individuales que representa la

capacidad adaptativa general; el valor es mayor en las celdas en las que coinciden un mayor número de instrumentos de conservación.

Figura 3. Valores de la capacidad adaptativa; la rampa de color indica el número de instrumentos de conservación que



coinciden espacialmente.

3.5.4 Vulnerabilidad

Dado que los valores que toman las variables se encuentran en diferentes escalas, se normalizaron los rasters generales de exposición y sensibilidad mediante la fórmula:

$$xn = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

de tal manera que el rango de valores es de 0 a 1. Ya que la sensibilidad y exposición tienen una distribución espacial diferente a la de la capacidad adaptativa, ya que abarca únicamente el área correspondiente a los polígonos de distribución potencial actual de las especies, se unieron estas últimas geometrías en un solo polígono y se extrajeron los valores de la capacidad adaptativa intersectados. Finalmente, se aplicó la fórmula de vulnerabilidad para obtener la correspondiente al área del territorio nacional en la que se distribuyen todas las especies incluidas en el análisis.

4 PRODUCTOS ELABORADOS

4.1 REVISIÓN DE LITERATURA ESPECIALIZADA

Se obtuvieron un total de 246 artículos y capítulos de libros únicos y depurados, de los cuales 69 corresponden a la búsqueda 1) climate change AND biodiversity AND exposure; 113 a la búsqueda 2) climate change AND biodiversity AND sensitivity; 40 a la búsqueda 3) climate change AND biodiversity AND adaptive capacity; 126 a la búsqueda 4) climate change AND biodiversity AND vulnerability y, 12 a la búsqueda 5) biodiversity AND exposure AND sensitivity AND adaptive capacity. Cabe mencionar que dentro de las búsquedas anteriores 51 artículos coincidieron en más de una búsqueda y nueve de ellos coincidieron en las cinco; tomándolos como registro único para la primera búsqueda en la que aparecieron.

La mayor proporción de artículos se publicó durante el año 2014 con 58 artículos (figura 4), de las 119 revistas registradas con publicaciones durante los años analizados, la que presentó mayor número de publicaciones fue PLoS ONE con 27 artículos, seguido de Global Change Biology con 19, Regional Environmental Change con 10, Biological Conservation con 9, Nature Communications con 7, Climatic Change con 7 y Diversity and Distributions con 6.

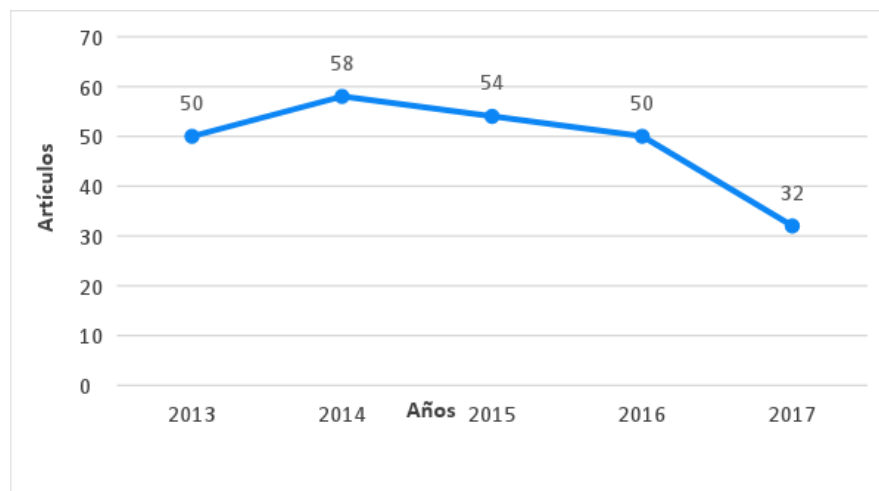


Figura 4. Número de artículos publicados por año de acuerdo a los criterios de búsqueda.

De acuerdo a los criterios de categorización, 17 artículos abordaron el marco de vulnerabilidad considerando sus tres indicadores; 84 se enfocaron en el análisis de vulnerabilidad de forma general, sin mencionar explícitamente la evaluación de alguna de sus tres dimensiones, ya que la exposición o sensibilidad, en algunos casos, se consideró como equivalente a vulnerabilidad (tabla 2).

La revisión mostró que el término capacidad adaptativa (CA) no está definido enteramente como un factor de enfoque social en el que se tome en cuenta los recursos, instrumentos, capital humano e institucional, sino que implica aspectos intrínsecos de las especies. De acuerdo con Beever *et al.* (2016), la CA se puede evaluar desde el enfoque de la teoría del nicho ecológico, considerando la CA fundamental como “la plasticidad fenotípica, capacidad de dispersión y colonización, la historia de vida, tasas evolutivas y la diversidad genética” y la CA realizada “refleja factores extrínsecos que afectan o limitan la CA fundamental de las especies”, principalmente por aspectos antropogénicos, aunque existen estresores de origen natural como la competencia.

Respecto al objeto de estudio, 32 se enfocaron en evaluar una sola especie, 82 a dos o más especies del mismo grupo, 39 realizaron evaluación a distintos taxones a nivel de clase (mamíferos, aves, reptiles, anfibios, peces, etc.), 84 evaluaron hábitats o ecosistemas y, 9 sobre marcos de análisis (tabla 3).

Los métodos más usados en la revisión bibliográfica fueron los incluidos en la categoría “modelos”, que incluye 123 publicaciones basadas en modelos de distribución de especies, proyecciones de cambio climático, amplitud de nicho, etc. Asimismo, se encontraron 57 publicaciones que emplearon una combinación de dos o más métodos (tabla 4).

Asimismo, se obtuvieron 13 artículos que proporcionaron un marco de referencia para evaluar la vulnerabilidad mediante pasos sistematizados para sus tres dimensiones (tabla 5).

Por último, se formuló una categoría para describir la aplicación de los artículos analizados. Se obtuvieron 69 cuya aplicación fue enfocada en la conservación y resiliencia (red de áreas de conservación, conectividad o planeación); 39 artículos tuvieron como enfoque la adaptación y mitigación; 116 se enfocaron al conocimiento de la vulnerabilidad de especies y/o ecosistemas; y 22 artículos estuvieron centrados en la combinación de dos o más enfoques de aplicación (tabla 6).

Tabla 2. Categorización con base en el enfoque de evaluación de los artículos

Enfoque de evaluación	Criterios	Número de artículos
Vulnerabilidad (General)	Aquellos artículos que evaluaron la exposición o la sensibilidad o la capacidad adaptativa, pero se mencionó como evaluación de vulnerabilidad general	229
Vulnerabilidad y sus tres dimensiones (Sensibilidad, exposición y capacidad adaptativa)	Aquellos artículos que mencionaron de forma explícita la evaluación de la vulnerabilidad en sus tres dimensiones	17

Tabla 3. Categorización con base en la unidad de análisis de los artículos

Objeto de estudio	Criterios	Número de artículos
Una sola especie	Aquellos artículos cuyo objeto de estudio se centró en una especie	32
Dos o más especies	Aquellos artículos cuyo objeto de estudio se centró en dos o más especies del mismo grupo taxonómico	82
Multi-taxón	Aquellos artículos cuyo objeto de estudio se centró en diferentes grandes grupos taxonómicos superiores al nivel de orden	39
Hábitat o ecosistema	Aquellos artículos cuyo objeto de estudio se centró en hábitat de alguna especie o ecosistema	84
Marco de análisis o marco para toma de decisiones	Aquellos artículos cuyo objeto de estudio fue un marco de análisis o un marco para la toma de decisiones en materia de vulnerabilidad y cambio climático	9

Tabla 4. Categorización con base en el método empleado en los artículos

Método	Criterios	Número de artículos
Modelos (amplitud de nicho, SDM y proyecciones CC)	Aquellos artículos cuyo método se basó en la elaboración de modelos estadísticos, de amplitud de nicho, modelo de distribución de especies y proyecciones de cambio climático	123
Tratamientos (experimentos controlados in-situ y ex-situ)	Aquellos artículos cuyo método se basó en procesos experimentales <i>controlados in-situ</i> o <i>exsitu</i>	24
Monitoreo biológico (evaluación en campo)	Aquellos artículos cuyo método se basó en datos obtenidos mediante monitoreo biológico o de variables fisico-químicas	13
Marco de evaluación	Aquellos artículos que se basaron en un marco de referencia preestablecido para evaluar vulnerabilidad	10
Búsquedas bibliográficas y bases de datos	Aquellos artículos cuyo método se basó en la obtención de datos mediante la búsqueda de literatura y bases de información	15

Método	Criterios	Número de artículos
Evaluación social	Aquellos artículos cuyo método se basó en entrevistas a pobladores locales y tomadores de decisiones	4
Combinación de dos tipos de método	(modelos-experimento, experimento-monitoreo biológico, búsquedas bibliográficas-modelos, etc.)	57

Tabla 5. Categorización con base en el tipo de resultado obtenido.

Producto	Criterios	Número de artículos
Marco de referencia	Artículos que generan una metodología para evaluar la vulnerabilidad y sus tres dimensiones	13

Tabla 6. Categorización con base en la aplicación hacia donde se dirige el estudio

Aplicación	Criterios	Número de artículos
Conservación y resiliencia (red de áreas de conservación, conectividad, planeación)	Aquellos artículos donde la aplicación de su estudio se dirigió hacia áreas protegidas, planeación de la conservación, conectividad de áreas y resiliencia	69
Adaptación y mitigación	Aquellos artículos donde la aplicación se dirigió a reducir y controlar los procesos que aceleran el cambio climático, así como los que proponen implementar acciones de prevención o reacción ante efectos del cambio climático.	39
Conocimiento de vulnerabilidad de especies y/o ecosistemas	Aquellos artículos donde su enfoque fue conocer la susceptibilidad de los efectos adversos del cambio climático	116
Combinación de dos o más enfoques de aplicación	Aquellos artículos donde su aplicación se dirigió a complementar análisis de vulnerabilidad con propuestas adaptación o mitigación	22

4.2 CONCEPTOS Y METODOLOGÍAS DE LAS TRES DIMENSIONES DE VULNERABILIDAD A NIVEL INSTITUCIONAL

Se obtuvieron las diversas definiciones correspondientes a los tres componentes de la vulnerabilidad de aquellas instituciones que, a nivel nacional o internacional, tienen atribuciones en materia del cambio climático, cuyos conceptos se describen en la tabla siguiente (tabla 7)

Tabla 7. Conceptos de vulnerabilidad a nivel institucional

Institución	Término	Concepto
Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (CONANP-FMCN-TNC, 2011)	Capacidad de adaptación	Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.
	Exposición	El tipo y grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas importantes.
	Sensibilidad	Nivel en el que un sistema resulta afectado, ya sea negativa o positivamente, por estímulos relacionados con el clima. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en la producción de las cosechas en respuesta a la media, gama o variabilidad de las temperaturas) o indirecto (los daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido a una elevación del nivel del mar).
	Vulnerabilidad	1. Grado en el cual un sistema es susceptible o está imposibilitado a responder ante los efectos del cambio climático, incluye su variabilidad y los extremos climáticos. 2. Elementos identificados previamente para las áreas protegidas en ejercicios de planeación y cuyos atributos ecológicos clave son vulnerables a factores directamente relacionados con el cambio climático y que, además, cuentan con certidumbre alta o muy alta de que serán afectados en las siguientes décadas (aunque se ignore la magnitud precisa). Se dispone de evidencias para la región, conocimiento de expertos, o de evidencias en otros casos de estudio donde los elementos en cuestión se encuentran bajo condiciones similares al complejo.
International Union for Conservation of Nature (IUCN) (Foden y Young, 2016)	Capacidad adaptativa	El potencial, capacidad o habilidad de las especies, ecosistema o sistema humano para ajustarse al cambio climático, para moderar el daño potencial, para tomar ventaja de las oportunidades, o responder a las consecuencias (IPCC, 2007a, 2014).
	Exposición	1. La presencia de gente, subsistencia, especies o ecosistemas, funciones ambientales, servicios y recursos, infraestructura económica, social o cultural en lugares o escenarios que pueden ser afectados severamente (IPCC, 2014). (No definido en IPCC, 2007). 2. La exposición describe la naturaleza, magnitud y proporción de los cambios ambientales y climáticos asociados a las especies (Dawson et al., 2011; Foden et al., 2013; Stein et al., 2014) (No definido en IPCC, 2007).
	Sensibilidad	Sensibilidad es el grado en el que un sistema es afectado, adversa o beneficiosamente, por la variabilidad o cambio del clima (IPCC, 2007a, 2014).

	Vulnerabilidad	<p>1. El grado en el que la biodiversidad es susceptible o incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático. En función de carácter, magnitud y proporción de cambio climático al que un sistema es expuesto, su sensibilidad y su capacidad adaptativa (IPCC, 2007a) (Diferente de PCC, 2014). 2. La tendencia o predisposición a ser afectado adversamente. En este contexto, vulnerabilidad engloba una variedad de conceptos, particularmente sensibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse. (IPCC, 2014) (Differs from IPCC, 2007).</p>
<p>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)</p>	Adaptabilidad	Adaptabilidad describe la habilidad de una comunidad o sociedad para ajustarse al peligro en cuestión de restaurarse o mantener la habilidad de funcionar.
	Capacidad adaptativa	El IE4 del IPCC describe la capacidad de adaptación como “la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y los fenómenos extremos) para moderar los daños potenciales, aprovechar las oportunidades, o para hacer frente a las consecuencias” (Parry et al. 2007). Consecuentemente, el Libro de la Vulnerabilidad considera el enfoque que la capacidad de adaptación es un conjunto de factores que determinan la capacidad de un sistema
	Exposición	<p>El término exposición denota la falta de protección de la gente, infraestructura y ecosistema contra eventos naturales extremos; el grado más alto de desprotección, y vulnerabilidad. De todos los componentes que contribuyen a la vulnerabilidad, la exposición es el único directamente vinculado a los parámetros del clima, es decir, al carácter, la magnitud, la rapidez del cambio y la variación en el clima. Los factores típicos de exposición incluyen la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración y el balance hídrico climático, así como los eventos extremos, como fuertes lluvias y la sequía meteorológica.</p> <p>Los cambios en estos parámetros pueden ejercer mayor presión adicional sobre los sistemas (por ejemplo, eventos de lluvia intensa, aumento de la temperatura, cambio del pico de lluvia de junio a mayo).</p>
	Sensibilidad	La sensibilidad determina el grado en que un sistema está adverso o beneficiosamente afectado por la exposición a un cambio climático dado. La sensibilidad se forma típicamente por atributos naturales y/o físicos del sistema, incluyendo la topografía, la capacidad de los diferentes tipos de suelo para resistir la erosión, tipo de cobertura terrestre. Pero también se refiere a las actividades humanas que afectan a la constitución física de un sistema, como los sistemas de labranza, manejo del agua, agotamiento de recursos y presión de la población. Como la mayoría de los sistemas se han adaptado a la situación actual (por ejemplo, la construcción de presas y diques, sistemas de riego), la sensibilidad ya incluye la adaptación histórica y reciente. Los factores sociales tales como la densidad de la población deben ser considerados sólo como sensibilidades si contribuyen directamente a un impacto del (cambio de) clima específico.
	Vulnerabilidad	Vulnerabilidad es la escasa habilidad de la sociedad o comunidad de protegerse a sí mismo contra impactos negativos o eventos externos, y recuperarse rápidamente de los efectos de los daños. El grado de vulnerabilidad determina el grado de pérdida causada por un desastre. La vulnerabilidad puede ser causada por factores político-institucionales, económicos y/o socioculturales, y es reforzada por el fenómeno de interlance entre el cambio climático, pobreza y crecimiento de la población.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (INECC, 2012)	Adaptación	Medidas y ajustes en sistemas humanos o naturales, como respuesta a estímulos climáticos, proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño, o aprovechar sus aspectos beneficiosos (LGCC, 2012).
	Vulnerabilidad	Es el grado al cual un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos (IPCC, 2007). Un sistema es vulnerable en la medida en que esté expuesto a un peligro.
Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (SEMARNAT, 2013)	Adaptación	Medidas y ajustes en sistemas humanos o naturales, como respuesta a estímulos climáticos, proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño, o aprovechar sus aspectos beneficiosos.
	Capacidad adaptativa	Conjunto de capacidades, recursos e instituciones de un país o región que permitirían implementar medidas de adaptación eficaces.
	Exposición	Presencia de personas; vida; servicios y recursos ambientales; infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares que pueden ser afectados de manera adversa.
	Vulnerabilidad	Nivel en el que un sistema es susceptible, o no es capaz de soportar los efectos adversos del Cambio Climático, incluida la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación.
Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS) (Monterroso <i>et al.</i> , 2014)	Adaptación	Ajuste de los sistemas humanos o naturales frente a entornos nuevos o cambiantes. La adaptación al cambio climático se refiere a los ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Se pueden distinguir varios tipos de adaptación, entre ellas la preventiva y la reactiva, la pública y privada, o la autónoma y la planificada.
	Capacidad adaptativa	Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad climática y los cambios extremos) a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.
	Exposición	El tipo y grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas importantes.
	Sensibilidad	Nivel en el que un sistema resulta afectado, ya sea negativa o positivamente, por estímulos relacionados con el clima. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en la producción de las cosechas en respuesta a la media, gama o variabilidad de las temperaturas) o indirecto (los daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido a una elevación del nivel del mar).
	Vulnerabilidad	Nivel al que un sistema es susceptible, o no es capaz de soportar, los efectos adversos del cambio climático, incluidos la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y velocidad de la variación climática al que se encuentra expuesto un sistema, su sensibilidad, y su capacidad de adaptación.

4.3 DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y SELECCIÓN DE ESPECIES ENDÉMICAS, PRIORITARIAS Y EN RIESGO DE EXTINCIÓN

Se partió de una lista inicial de 1,184 especies endémicas bajo cualquier categoría de riesgo, así como aquellas incluidas en la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación, diferentes a las de la NOM-059-SEMARNAT-2010 (figura 5; tabla 8).

Tabla 8. Número de especies por categoría y fuente de la lista inicial. A: amenazadas, P: en peligro de extinción; Pr: sujetas a protección especial.

No. de especies	Categoría	Fuente
312	A	NOM-059
159	P	NOM-059
542	Pr	NOM-059
34	A	Prioritaria
66	-	Prioritaria
3	E	Prioritaria
44	P	Prioritaria
24	Pr	Prioritaria

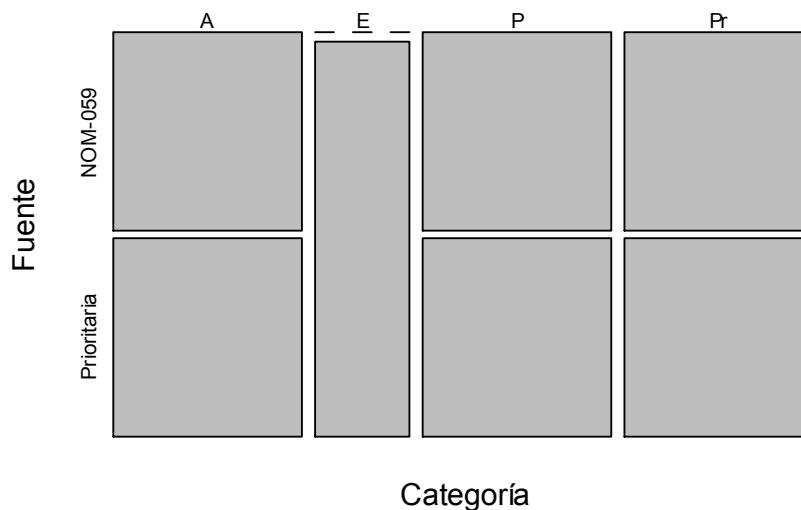


Figura 5. Proporción de especies por fuente y categoría, Prioritaria: lista de especies prioritarias para la conservación contenidas en el Diario oficial de la Federación; NOM-059: NOM-059-SEMARNAT-2010; A: amenazadas; P: en peligro de extinción; Pr: sujetas a protección especial.

Con base en los criterios de selección, depuración y la revisión manual (figura 6), se obtuvieron un total de 206 especies endémicas, prioritarias y en riesgo, a partir de las cuales se calculó la vulnerabilidad al cambio climático (figura 7; tabla 9).

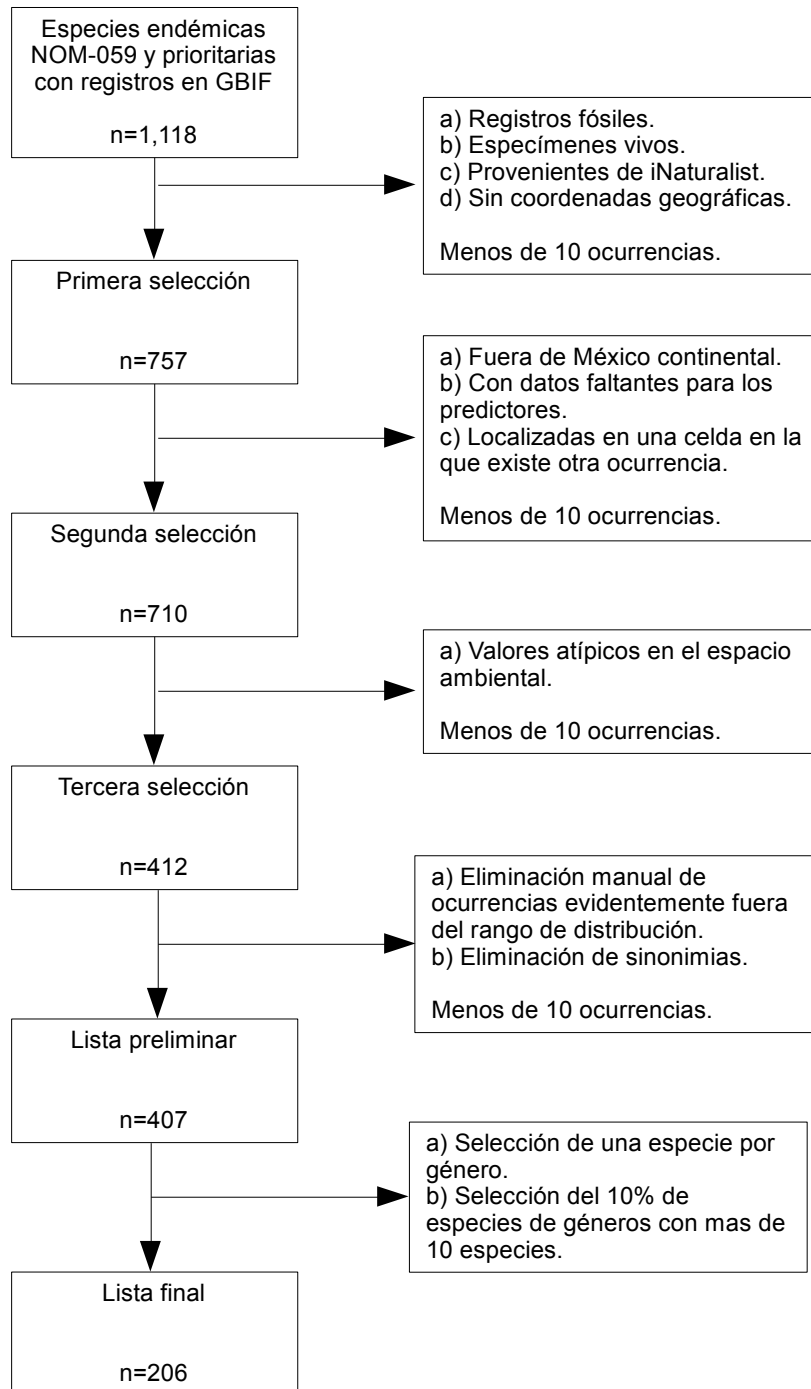


Figura 6. Diagrama de flujo para la inclusión de especies de forma automatizada.

Tabla 9. Lista resultante del proceso de control de calidad.

Id	Clase	Nombre científico	Id	Clase	Nombre científico
1	Pinopsida	<i>Abies guatemalensis</i>	104	Aves	<i>Jabiru mycteria</i>
2	Reptilia	<i>Abronia graminea</i>	105	Reptilia	<i>Kinosternon herrerae</i>
3	Reptilia	<i>Adelphicos nigrilatatum</i>	106	Liliopsida	<i>Laelia speciosa</i>
4	Amphibia	<i>Agalychnis callidryas</i>	107	Magnoliopsida	<i>Laguncularia racemosa</i>
5	Liliopsida	<i>Agave angustifolia</i>	108	Reptilia	<i>Lampropeltis mexicana</i>
6	Aves	<i>Aimophila notosticta</i>	109	Reptilia	<i>Lepidophyma gaigeae</i>
7	Magnoliopsida	<i>Alfaroa mexicana</i>	110	Reptilia	<i>Leptodeira maculata</i>
8	Mammalia	<i>Alouatta palliata</i>	111	Mammalia	<i>Leptonycteris nivalis</i>
9	Aves	<i>Amazilia viridifrons</i>	112	Reptilia	<i>Leptophis diplotropis</i>
10	Aves	<i>Amazona albifrons</i>	113	Mammalia	<i>Lepus callotis</i>
11	Amphibia	<i>Ambystoma altamirani</i>	114	Amphibia	<i>Lithobates brownorum</i>
12	Aves	<i>Anas acuta</i>	115	Mammalia	<i>Lontra longicaudis</i>
13	Amphibia	<i>Anaxyrus californicus</i>	116	Aves	<i>Lophodytes cucullatus</i>
14	Reptilia	<i>Anelytropsis papillosus</i>	117	Magnoliopsida	<i>Magnolia mexicana</i>
15	Reptilia	<i>Anolis anisolepis</i>	118	Magnoliopsida	<i>Mammillaria candida</i>
16	Aves	<i>Anser albifrons</i>	119	Mammalia	<i>Mazama pandora</i>
17	Aves	<i>Anthus spragueii</i>	120	Mammalia	<i>Megadontomys cryophilus</i>
18	Mammalia	<i>Antilocapra americana</i>	121	Aves	<i>Megascops seductus</i>
19	Reptilia	<i>Apalone spinifera</i>	122	Aves	<i>Meleagris gallopavo</i>
20	Aves	<i>Aquila chrysaetos</i>	123	Aves	<i>Mergus merganser</i>
21	Aves	<i>Ara macao</i>	124	Reptilia	<i>Mesaspis juarezi</i>
22	Aves	<i>Aratinga canicularis</i>	125	Mammalia	<i>Microtus oaxacensis</i>
23	Reptilia	<i>Aspidoscelis calidipes</i>	126	Reptilia	<i>Micrurus diastema</i>
24	Mammalia	<i>Ateles geoffroyi</i>	127	Mammalia	<i>Nelsonia neotomodon</i>
25	Magnoliopsida	<i>Avicennia germinans</i>	128	Mammalia	<i>Neotoma phenax</i>
26	Aves	<i>Aythya affinis</i>	129	Aves	<i>Nomonyx dominicus</i>
27	Reptilia	<i>Barisia imbricata</i>	130	Magnoliopsida	<i>Noveloa coulteriana</i>
28	Aves	<i>Bartramia longicauda</i>	131	Aves	<i>Nyctiphrynus mcleodii</i>
29	Amphibia	<i>Batrachoseps major</i>	132	Magnoliopsida	<i>Nymphaea gracilis</i>
30	Liliopsida	<i>Beaucarnea goldmanii</i>	133	Mammalia	<i>Odocoileus hemionus</i>
31	Liliopsida	<i>Beschorneria calcicola</i>	134	Liliopsida	<i>Olmeca recta</i>
32	Aves	<i>Bolborhynchus lineola</i>	135	Magnoliopsida	<i>Olneya tesota</i>
33	Amphibia	<i>Bolitoglossa alberchi</i>	136	Liliopsida	<i>Oncidium incurvum</i>
34	Liliopsida	<i>Brahea aculeata</i>	137	Reptilia	<i>Ophryacus undulatus</i>
35	Aves	<i>Branta bernicla</i>	138	Magnoliopsida	<i>Opuntia excelsa</i>
36	Aves	<i>Brotogeris jugularis</i>	139	Aves	<i>Oreophasis derbianus</i>

37	Aves	<i>Bucephala albeola</i>	140	Mammalia	<i>Ovis canadensis</i>
38	Magnoliopsida	<i>Bursera arborea</i>	141	Aves	<i>Oxyura jamaicensis</i>
39	Reptilia	<i>Caiman crocodilus</i>	142	Aves	<i>Pandion haliaetus</i>
40	Aves	<i>Cairina moschata</i>	143	Mammalia	<i>Panthera onca</i>
41	Liliopsida	<i>Calibanus hookeri</i>	144	Amphibia	<i>Parvimolge townsendi</i>
42	Mammalia	<i>Callospermophilus madrensis</i>	145	Aves	<i>Passerina rositae</i>
43	Aves	<i>Campylopterus excellens</i>	146	Aves	<i>Patagioenas fasciata</i>
44	Aves	<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	147	Mammalia	<i>Peromyscus zarhynchus</i>
45	Mammalia	<i>Canis lupus</i>	148	Reptilia	<i>Petrosaurus thalassinus</i>
46	Reptilia	<i>Celestus enneagrammus</i>	149	Aves	<i>Peucaea sumichrasti</i>
47	Cycadopsida	<i>Ceratozamia mexicana</i>	150	Aves	<i>Pharomachrus mocinno</i>
48	Reptilia	<i>Cerrophidion tzotzilorum</i>	151	Aves	<i>Phoenicopterus ruber</i>
49	Liliopsida	<i>Chamaedorea cataractarum</i>	152	Reptilia	<i>Phrynosoma orbiculare</i>
50	Amphibia	<i>Charadrahyla chaneque</i>	153	Reptilia	<i>Phyllodactylus bordai</i>
51	Aves	<i>Charadrius melodus</i>	154	Pinopsida	<i>Picea chihuahuana</i>
52	Aves	<i>Chen caerulescens</i>	155	Pinopsida	<i>Pinus culminicola</i>
53	Reptilia	<i>Chersodromus liebmanni</i>	156	Aves	<i>Pionopsitta haematotis</i>
54	Reptilia	<i>Chilomeniscus stramineus</i>	157	Aves	<i>Pionus senilis</i>
55	Magnoliopsida	<i>Chiranthodendron pentadactylon</i>	158	Reptilia	<i>Pituophis deppei</i>
56	Amphibia	<i>Chiropterotriton arboreus</i>	159	Aves	<i>Platalea ajaja</i>
57	Liliopsida	<i>Coccothrinax readii</i>	160	Amphibia	<i>Plectrohyla acanthodes</i>
58	Magnoliopsida	<i>Conocarpus erectus</i>	161	Reptilia	<i>Plestiodon copei</i>
59	Reptilia	<i>Conopsis biserialis</i>	162	Liliopsida	<i>Polianthes longiflora</i>
60	Mammalia	<i>Cratogeomys fumosus</i>	163	Aves	<i>Polioptila californica</i>
61	Amphibia	<i>Craugastor decoratus</i>	164	Magnoliopsida	<i>Populus guzmanantlensis</i>
62	Reptilia	<i>Crocodylus acutus</i>	165	Reptilia	<i>Porthidium dunnii</i>
63	Reptilia	<i>Crotalus aquilus</i>	166	Aves	<i>Progne sinaloae</i>
64	Mammalia	<i>Cryptotis goldmani</i>	167	Liliopsida	<i>Prosthechea citrina</i>
65	Reptilia	<i>Ctenosaura hemilopha</i>	168	Amphibia	<i>Pseudoeurycea altamontana</i>
66	Aves	<i>Cyanocorax beecheii</i>	169	Amphibia	<i>Ptychohyla leonhardschultzei</i>
67	Aves	<i>Cyanolyca mirabilis</i>	170	Aves	<i>Puffinus opisthomelas</i>
68	Polypodiopsida	<i>Cyathea firma</i>	171	Magnoliopsida	<i>Rhizophora mangle</i>
69	Mammalia	<i>Cynomys ludovicianus</i>	172	Aves	<i>Rhynchopsitta pachyrhyncha</i>
70	Magnoliopsida	<i>Dahlia scapigera</i>	173	Liliopsida	<i>Rhynchostele cervantesii</i>
71	Insecta	<i>Danaus plexippus</i>	174	Aves	<i>Ridgwayia pinicola</i>
72	Aves	<i>Deltarhynchus flammulatus</i>	175	Mammalia	<i>Romerolagus diazi</i>
73	Aves	<i>Dendrocygna autumnalis</i>	176	Liliopsida	<i>Sagittaria macrophylla</i>
74	Aves	<i>Dendrotyx barbatus</i>	177	Reptilia	<i>Salvadora bairdi</i>
75	Reptilia	<i>Dermatemys mawii</i>	178	Reptilia	<i>Sauromalus ater</i>

76	Cycadopsida	<i>Dioon edule</i>	179	Reptilia	<i>Sceloporus adleri</i>
77	Mammalia	<i>Dipodomys phillipsii</i>	180	Reptilia	<i>Scincella silvicola</i>
78	Aves	<i>Doricha eliza</i>	181	Mammalia	<i>Sciurus oculatus</i>
79	Amphibia	<i>Duellmanohyla schmidtorum</i>	182	Mammalia	<i>Spilogale pygmaea</i>
80	Magnoliopsida	<i>Echinocactus platyacanthus</i>	183	Aves	<i>Spizaetus melanoleucus</i>
81	Liliopsida	<i>Encyclia adenocaula</i>	184	Aves	<i>Spizella wortheni</i>
82	Aves	<i>Eupherusa cyanophrys</i>	185	Aves	<i>Streptoprocne semicollaris</i>
83	Aves	<i>Euptilotis neoxenus</i>	186	Liliopsida	<i>Synechanthus fibrosus</i>
84	Amphibia	<i>Exerodonta melanomma</i>	187	Reptilia	<i>Tantilla calamarina</i>
85	Magnoliopsida	<i>Ferocactus histrix</i>	188	Mammalia	<i>Tapirella bairdii</i>
86	Aves	<i>Forpus cyanopygius</i>	189	Mammalia	<i>Tayassu pecari</i>
87	Magnoliopsida	<i>Fouquieria fasciculata</i>	190	Aves	<i>Thalurania ridgwayi</i>
88	Liliopsida	<i>Furcraea parmentieri</i>	191	Reptilia	<i>Thamnophis chrysocephalus</i>
89	Aves	<i>Gallinago delicata</i>	192	Magnoliopsida	<i>Thelocactus bicolor</i>
90	Reptilia	<i>Geagras redimitus</i>	193	Amphibia	<i>Thorius dubitus</i>
91	Reptilia	<i>Geophis latifrontalis</i>	194	Liliopsida	<i>Tigridia huajuapaneensis</i>
92	Aves	<i>Geothlypis beldingi</i>	195	Liliopsida	<i>Tillandsia pueblensis</i>
93	Aves	<i>Geotrygon carrikeri</i>	196	Amphibia	<i>Tlalocohyla godmani</i>
94	Aves	<i>Glaucidium sanchezi</i>	197	Liliopsida	<i>Tripsacum zopilotense</i>
95	Reptilia	<i>Gopherus berlandieri</i>	198	Reptilia	<i>Uma exsul</i>
96	Aves	<i>Grus canadensis</i>	199	Reptilia	<i>Urosaurus nigricaudus</i>
97	Magnoliopsida	<i>Guaiaacum coulteri</i>	200	Mammalia	<i>Ursus americanus</i>
98	Reptilia	<i>Gyalopion quadrangulare</i>	201	Reptilia	<i>Uta stansburiana</i>
99	Reptilia	<i>Heloderma horridum</i>	202	Liliopsida	<i>Vanilla planifolia</i>
100	Mammalia	<i>Heteromys nelsoni</i>	203	Aves	<i>Vireo brevipennis</i>
101	Amphibia	<i>Hyla euphorbiacea</i>	204	Reptilia	<i>Xenosaurus platyceps</i>
102	Aves	<i>Hylorchilus navai</i>	205	Aves	<i>Xenospiza baileyi</i>
103	Reptilia	<i>Iguana iguana</i>	206	Cycadopsida	<i>Zamia katzneriana</i>

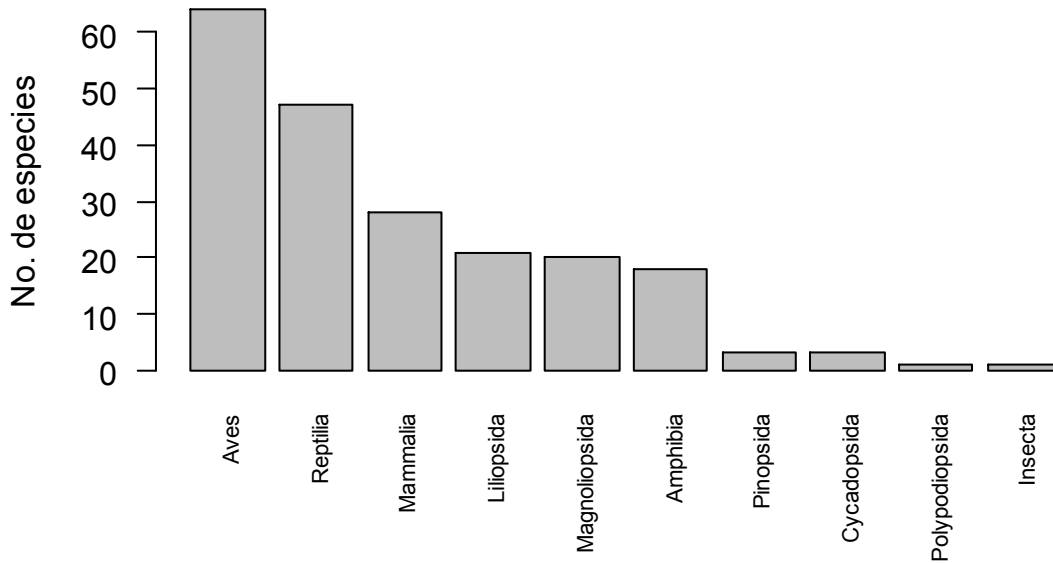


Figura 7. Número de especies por clase de la lista final de especies.

4.4 DETERMINACIÓN DE VARIABLES PARA DESCRIBIR EXPOSICIÓN, SENSIBILIDAD Y CAPACIDAD ADAPTATIVA

La combinación de condiciones climáticas no análogas, nichos climáticos estrechos y distribuciones geográficas reducidas aumentan la vulnerabilidad de las especies tropicales al cambio climático (Ribeiro *et al.*, 2016). De acuerdo a lo establecido en los términos de referencia, el marco conceptual para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático (IPCC, 2007) se apejó a la fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

4.4.1 Sensibilidad.

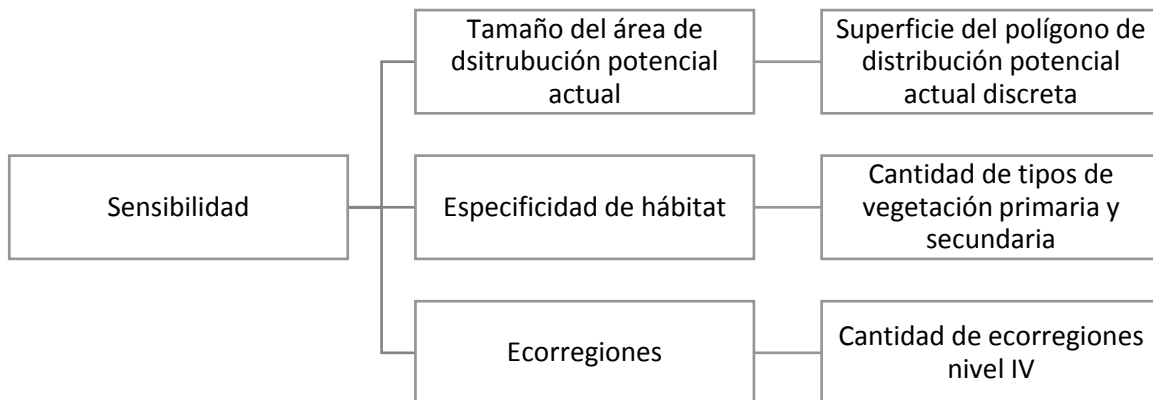


Figura 8. Esquema conceptual para el cálculo de la sensibilidad.

Sensibilidad (SENS) es el grado en que un sistema resulta afectado por la variabilidad o el cambio climático debido a las características que lo definen (CGACC, basadas en IPCC, 2007). De acuerdo a ésta definición, la sensibilidad de las especies se construyó considerando los siguientes criterios:

- 1) *Tamaño del área de distribución.* Este atributo se correlaciona con la sensibilidad de las especies al cambio climático (Thuiller *et al.*, 2005); se espera que mientras mayor sea el área de distribución, menor será la sensibilidad de la especie. El área de distribución se calculará considerando la distribución potencial actual (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005a), es decir, la distribución potencial delimitada con el hábitat natural remanente (vegetación primaria y secundaria), excluyendo sitios perturbados, ya que no mantienen condiciones ecológicas viables para la persistencia de las especies (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005a, 2005b, 2009, 2012; Botello *et al.*, 2017).
- 2) *Especificidad de hábitat.* Esta característica es considerada en el Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad al Cambio Climático de la UICN. Se espera que el cambio climático probablemente llevará a la mayoría de las especies a enfrentar cambios en sus hábitats y microhábitats; aquellas que estén menos asociadas a condiciones y requisitos específicos, probablemente sean menos vulnerables (Carr *et al.*, 2014). La especificidad de hábitat se calculará cuantificando los diferentes tipos de vegetación primaria y secundaria donde se presenta la especie.
- 3) *Zonas características donde se encuentra la especie.* Considerando a las ecorregiones como unidades que no contienen barreras geográficas que impiden la dispersión de las especies (Botello *et al.*, 2015). Éstas son una regionalización basada en las condiciones climatológicas, edafológicas y geológicas donde se distribuyen un grupo característico de especies y comunidades ecológicas (Challenger y Soberón, 2008; WWF, 2012).

4.4.2 Exposición.

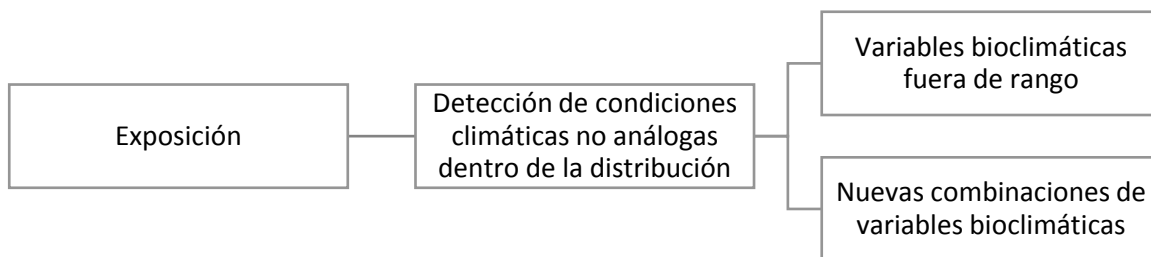


Figura 9. Esquema conceptual para el cálculo de la exposición.

Exposición (EXPO) es el carácter, magnitud y velocidad de cambio y variación del clima que afecta un sistema (CGACC, basadas en IPCC, 2007). De acuerdo con esta definición, la exposición se calcularía cuantificando el cambio en los valores actuales de temperatura y precipitación con respecto a los escenarios de cambio climático, de las áreas de distribución potencial actual de las especies. Sin embargo, estas variables por sí solas posiblemente no sean lo suficientemente específicas para caracterizar de forma adecuada el nicho de las especies a incluir en el análisis. Por ejemplo, durante la limpieza de datos, el método automatizado de detección de valores atípicos no identificó ocurrencias que evidentemente, se encontraban fuera del área de distribución en el espacio geográfico cuando se usaron únicamente las temperaturas y precipitaciones mínimas y máximas como predictores. Al usar las 19 variables bioclimáticas, estas ocurrencias fueron correctamente identificadas como valores atípicos en el espacio ambiental. Por ello, para el cálculo de la exposición se utilizaron las variables bioclimáticas (Hijmans *et al.*, 2005), que representan variables biológicamente significativas generadas a partir de los valores mensuales de temperatura y precipitación actuales y bajo escenarios de cambio climático. Éstas se usan a menudo en el modelado de distribución de especies y de nicho ecológico, y representan las tendencias anuales, la estacionalidad y los factores ambientales extremos o limitantes.

A pesar de sus limitaciones y críticas (Dawson *et al.*, 2011), de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, la mayoría de las aproximaciones utilizadas para calcular la vulnerabilidad de las especies utilizan técnicas de modelado de distribución o modelado de nicho ecológico. Estas técnicas implican la transferencia de las predicciones de los modelos a nuevas regiones y/o períodos de tiempo.

El clima es uno de los principales factores que restringen la distribución de especies y la función del ecosistema (Williams *et al.*, 2007). A medida que el clima continúe cambiando, muchas especies podrían estar expuestas a condiciones climáticas que probablemente excedan su tolerancia fisiológica (Ribeiro *et al.*, 2016). La respuesta de las especies ante el cambio climático puede ser la modificación de sus patrones de abundancia o distribución, la extinción o la evolución (Holt, 1990).

Se esperan condiciones climáticas no análogas en casi un tercio de la superficie terrestre al final del siglo XXI y se proyecta que en el 10 al 48% desaparecerán las condiciones climáticas actuales (Williams *et al.*, 2007). En el contexto del modelado de nicho ecológico, las condiciones nuevas pueden presentarse de dos formas: a) variables individuales con valores fuera del rango utilizado para generar el modelo (univariada) y b) variables individuales dentro del rango utilizado para generar el modelo, pero con nuevas combinaciones (multivariada) (Zurel *et al.*, 2012).

La superficie de similitud ambiental multivariada (MESS) es un índice que representa la similitud entre un punto determinado y un conjunto de puntos de referencia con respecto a una serie de variables (Elith *et al.*, 2010). Este índice permite identificar zonas en el espacio geográfico en las que los valores de las variables utilizadas para calibrar el modelo se encuentran fuera de rango.

Estas zonas representan ambientes no análogos o “nuevos” en los que la proyección del modelo tiene un grado importante de incertidumbre asociada (Venette, 2017).

Este método considera únicamente los rangos de las variables predictoras individuales (Mesgaran *et al.*, 2014), de tal manera que el valor del MESS de un sitio está determinado por la variable cuyo valor es el más disímil a los de los puntos de referencia (Elith *et al.*, 2010). Dado que los modelos de distribución generalmente se calibran con múltiples variables predictoras que pueden presentar correlaciones entre ellas, Mesgaran *et al.* (2014) propusieron un método (ExDet) para identificar ambientes no análogos mediante la detección de nuevas combinaciones de variables, que pueden presentarse aun cuando los rangos de las variables individuales no difieran de los de los puntos de referencia. Además de la detección de nuevas combinaciones (NT2), el ExDet incluye el análisis de similitud ambiental univariada (NT1) equivalente al MESS. El MESS se basa en el valor negativo más alto; si un punto se encuentra del rango de una variable predictora dada, obtendría un valor negativo basado en la distancia al mínimo/máximo de esa variable. A diferencia del MESS, ExDet, suma estas distancias sobre todas las variables predictoras para derivar el índice NT1 (<https://www.climond.org/ExDet.aspx>).

Si se asume que el polígono de distribución potencial actual comprende la totalidad de valores de las variables que determinan el nicho realizado de las especies, y si en el análisis de detección de ambientes no análogos, se consideran únicamente los valores de las variables bioclimáticas (actuales y a futuro) dentro de este polígono, entonces la transferencia es únicamente temporal, es decir, a los escenarios de cambio climático. Esto implica que la detección de ambientes no análogos reflejará los cambios a futuro en el nicho climático, y no aquellos cambios producto de un muestreo incompleto de los predictores o una proyección de los modelos a un espacio geográfico diferente. Bajo estos supuestos, se considera al ExDet un método adecuado para el cálculo de la exposición.

4.4.3 Capacidad adaptativa

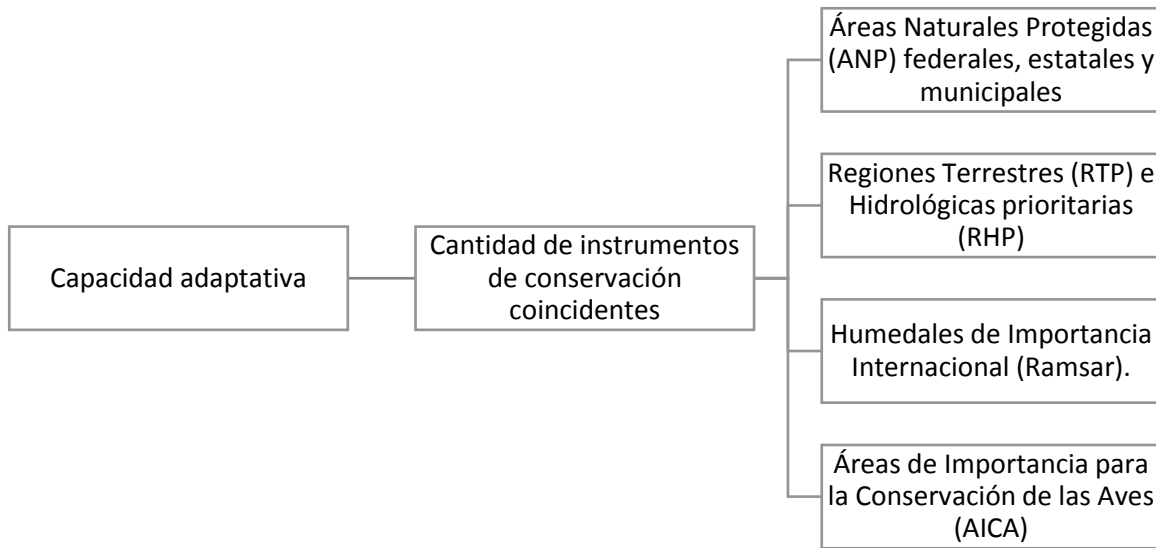


Figura 10. Esquema conceptual para el cálculo de la capacidad adaptativa.

La capacidad adaptativa (CA) se refiere a los recursos, instrumentos, capital humano e institucional que permiten detonar procesos de adaptación para la reducción de la vulnerabilidad (CGACC, basadas en IPCC, 2007). Se calculó realizando una sobreposición cartográfica aditiva (figura 5) de los polígonos que delimitan:

1. Áreas Naturales Protegidas (ANP) federales, estatales y municipales.
2. Regiones Terrestres (RTP) e Hidrológicas prioritarias (RHP).
3. Humedales de Importancia Internacional (Ramsar).
4. Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA).

No se consideraron las Unidades de Conservación y Manejo para la Vida Silvestre (UMA) ni el capital humano, por la dificultad de obtener los datos asociados de forma espacialmente explícita. El incluir las UMA implica la mezcla de geometrías diferentes que no tendrían sentido desde el punto de vista del análisis espacial (por ejemplo, puntos), además de que únicamente aportarían un valor para la CA si son específicas para alguna de las especies consideradas en el análisis.

5 EJEMPLIFICACIÓN DE PROPUESTA METODOLÓGICA APLICADA A UN GRUPO SELECTO DE ESPECIES PRIORITARIAS, ENDÉMICAS Y EN RIESGO.

Siguiendo el método descrito en la sección 3.5, se calculó la vulnerabilidad al cambio climático de un grupo de 10 especies seleccionadas al azar de la lista final. Las variables que determinan la sensibilidad se calcularon para el total de 206 especies, sin embargo, dado el poder de cómputo y tiempo requerido para calcular la exposición, se restringió el análisis a 10 especies.

Tabla 10. Valores para calcular la sensibilidad de las 10 especies seleccionadas; *occ_n*: número de ocurrencias, *eco_n*: número de ecorregiones en la que está presente la especie, *usv_n*: número de tipos de vegetación en los que hay ocurrencias de la especie, *área*: superficie del polígono de distribución potencial actual.

Nombre científico	Clase	<i>occ_n</i>	<i>eco_n</i>	<i>usv_n</i>	área
<i>Agave angustifolia</i>	Liliopsida	464	51	31	312580.594
<i>Campylorhynchus chiapensis</i>	Aves	119	2	6	7283.11063
<i>Celestus enneagrammus</i>	Reptilia	10	3	3	391.579762
<i>Crotalus aquilus</i>	Reptilia	11	2	5	23871.5061
<i>Guaiaacum coulteri</i>	Magnoliopsida	256	31	26	316446.435
<i>Oxyura jamaicensis</i>	Aves	773	65	37	392625.002
<i>Phrynosoma orbiculare</i>	Reptilia	277	11	15	187756.978
<i>Polianthes longiflora</i>	Liliopsida	21	6	1	26058.6407
<i>Streptoprocne semicollaris</i>	Aves	217	21	20	321581.165
<i>Urosaurus nigricaudus</i>	Reptilia	53	10	11	56348.7245

Se obtuvieron 12 mapas que muestran la vulnerabilidad a los diferentes escenarios de cambio climático a nivel nacional, de acuerdo al total de las especies analizadas (figura 11-24). Los valores van de 0 a 1, siendo 1 la vulnerabilidad más alta. Ya que la sensibilidad y exposición están asociadas a los polígonos de distribución actual de las especies individuales, los mapas reflejan la vulnerabilidad únicamente en las zonas del territorio nacional ocupadas por las especies analizadas. En este sentido, una vulnerabilidad alta puede estar dada por a) la presencia de una o pocas especies altamente vulnerables o b) la coincidencia espacial de varias especies.

GFDL_4.5_2015.2039

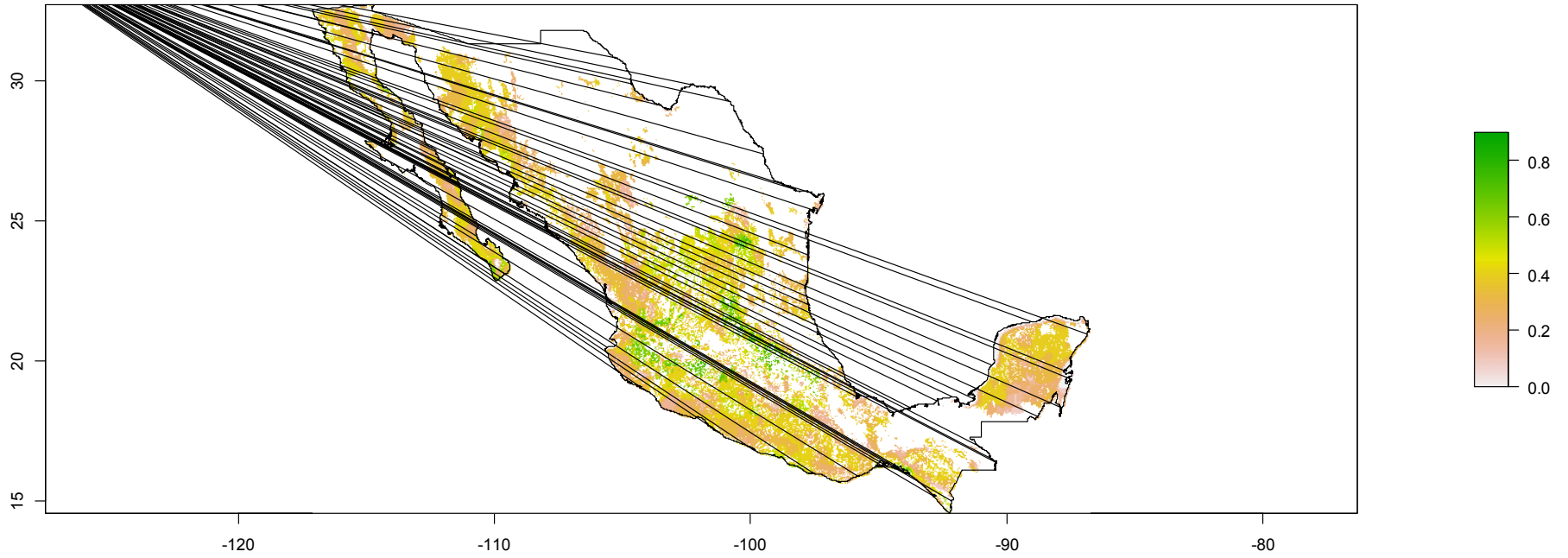


Figura 11. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario GFDL_4.5_2015-2039.

GFDL_4.5_2045.2069

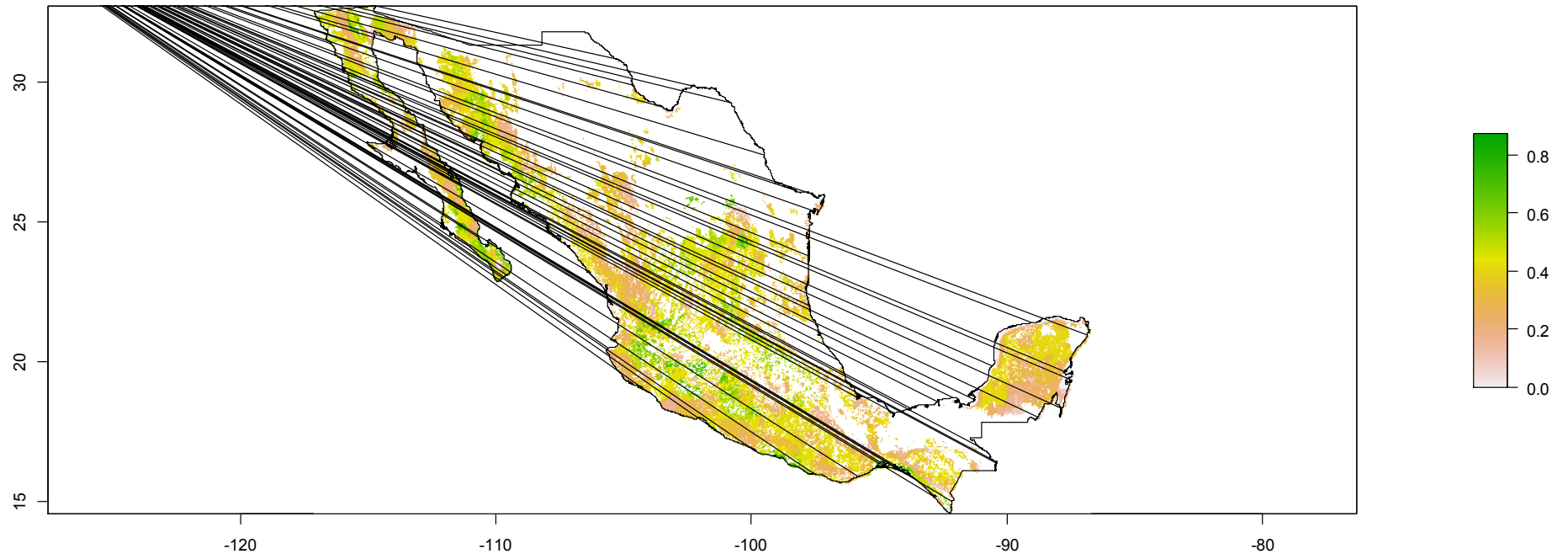


Figura 12. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario GFDL_4.5_2045-2069.

GFDL_8.5_2015.2039

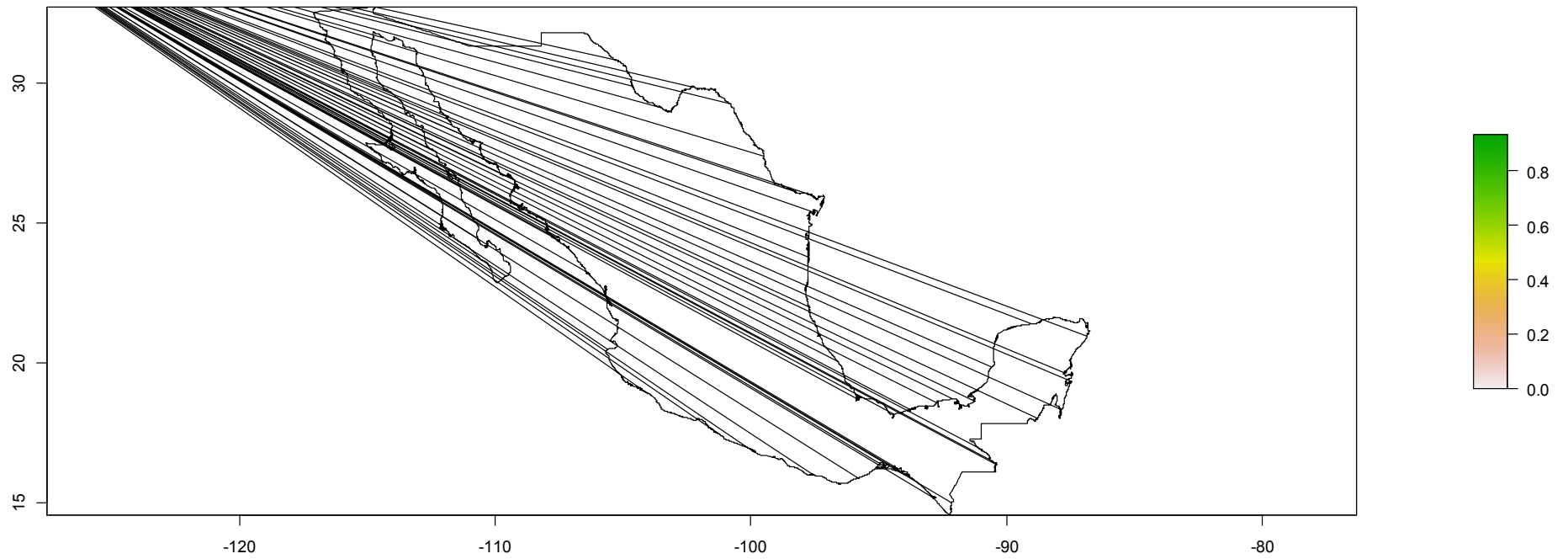


Figura 13. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario GFDL_8.5_2015-2039.

GFDL_8.5_2045.2069

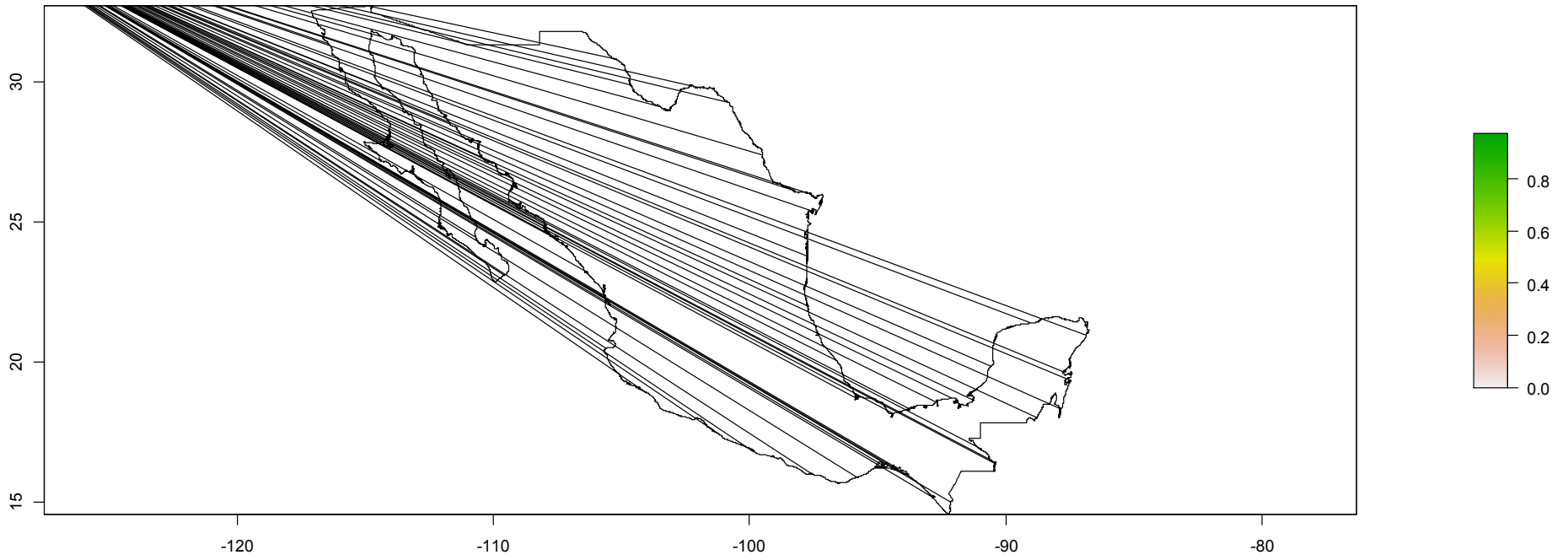


Figura 14. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario GFDL_8.5_2045-2069.

HADGEM2_ES_4.5_2015.2039

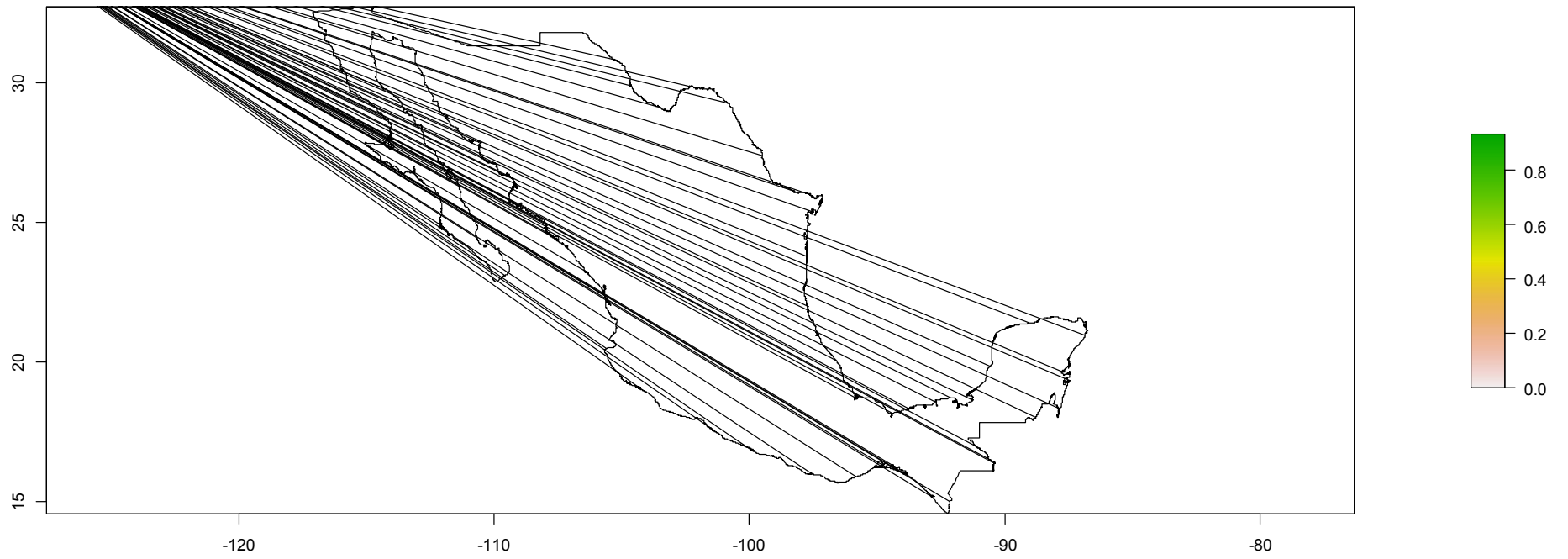


Figura 15. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario HADGEM2_ES_4.5_2015-2039.

HADGEM2_ES_4.5_2045.2069

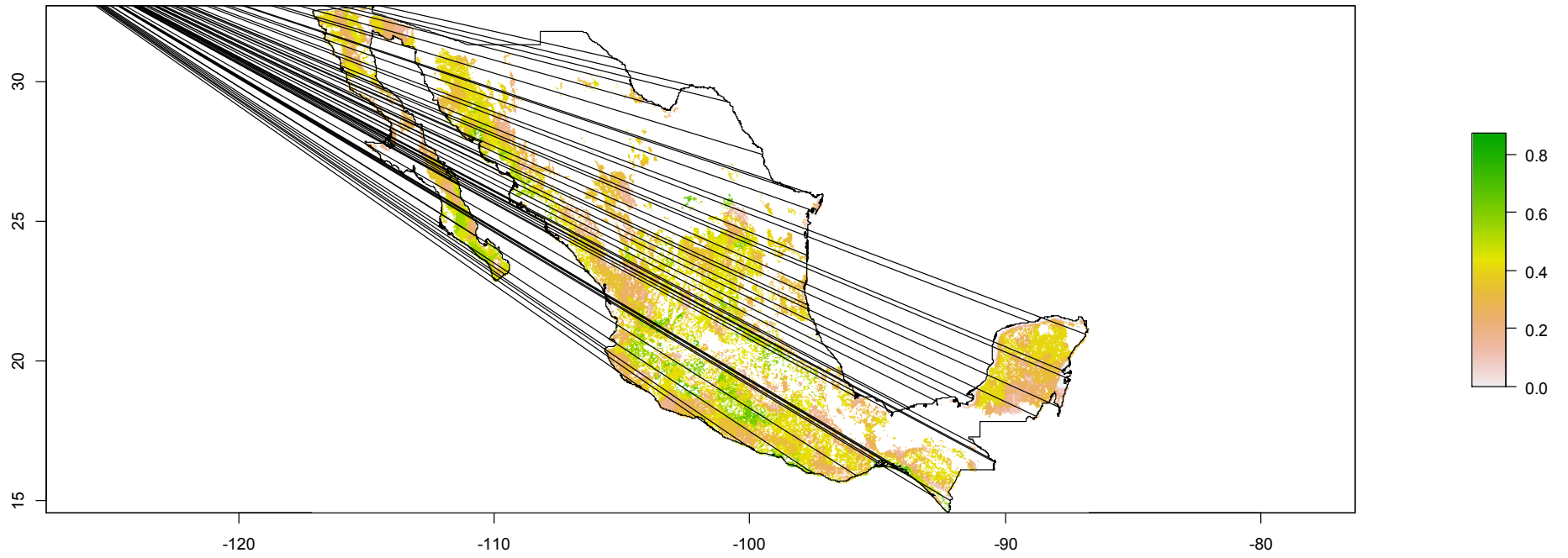


Figura 16. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario HADGEM2_ES_4.5_2045-2069.

HADGEM2_ES_8.5_2015.2039

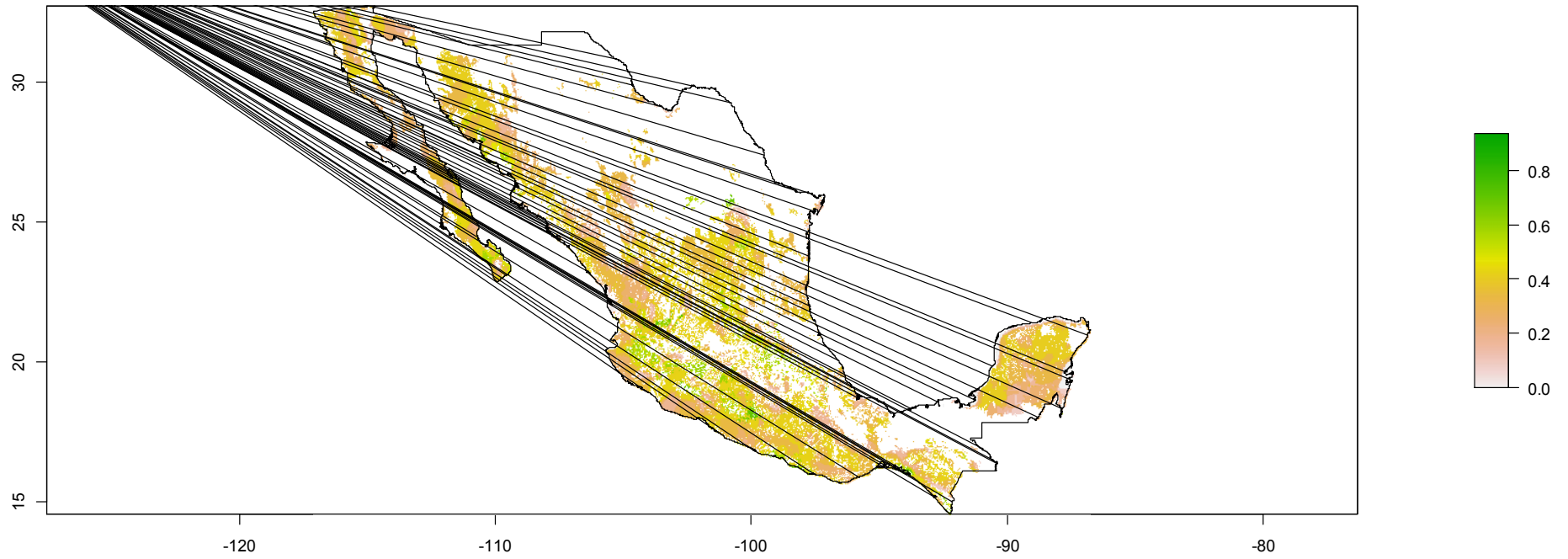


Figura 17. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario HADGEM2_ES_8.5_2015-2039.

HADGEM2_ES_8.5_2045.2069

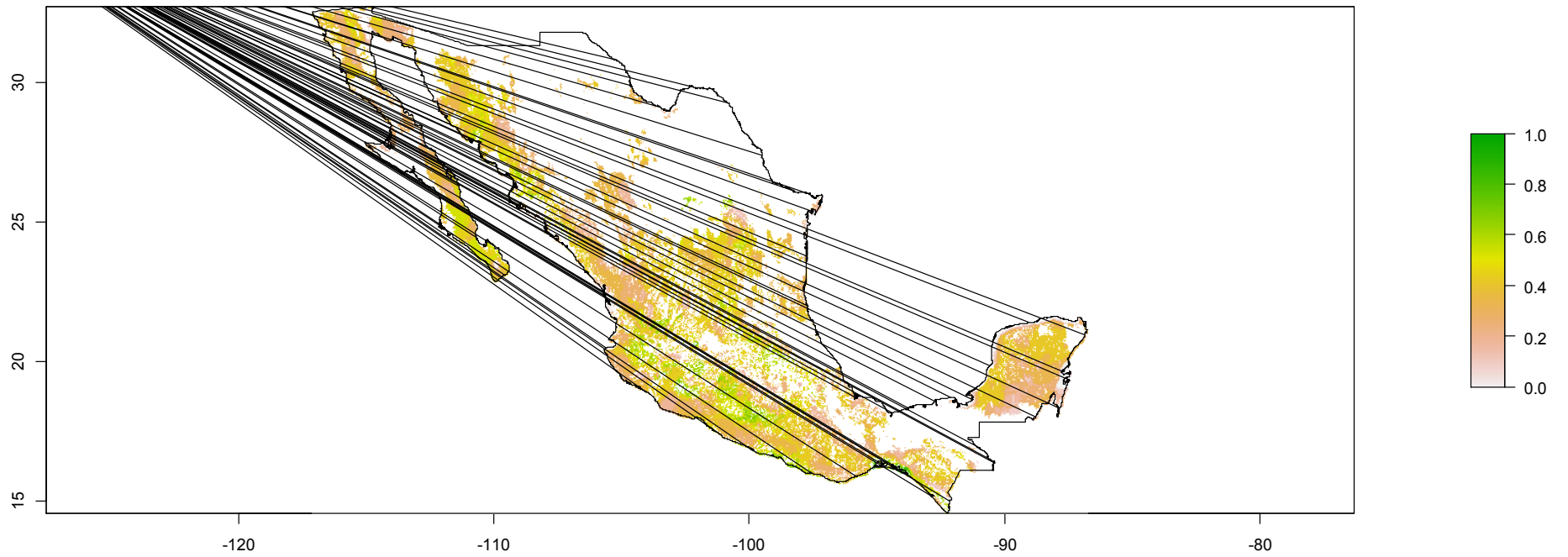


Figura 18. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario HADGEM2_ES_8.5_2045-2069.

MPI_ESM_4.5_2015.2039

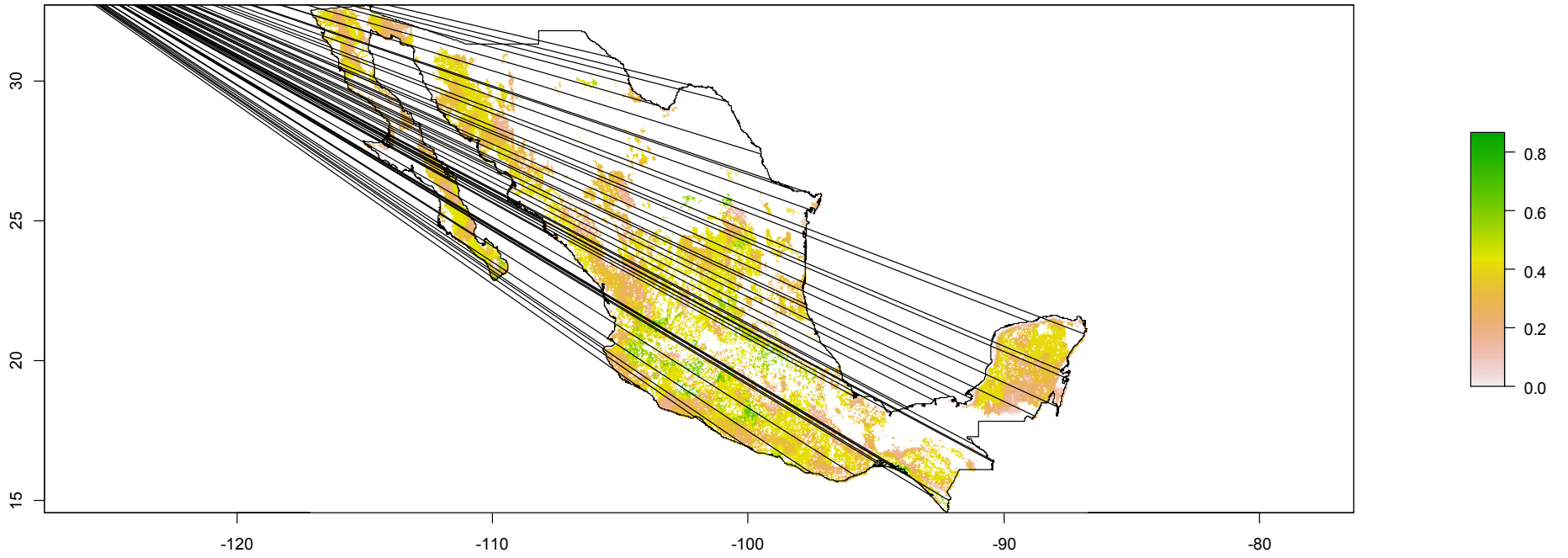


Figura 19. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario MPI_ESM_4.5_2015-2039.

MPI_ESM_4.5_2045.2069

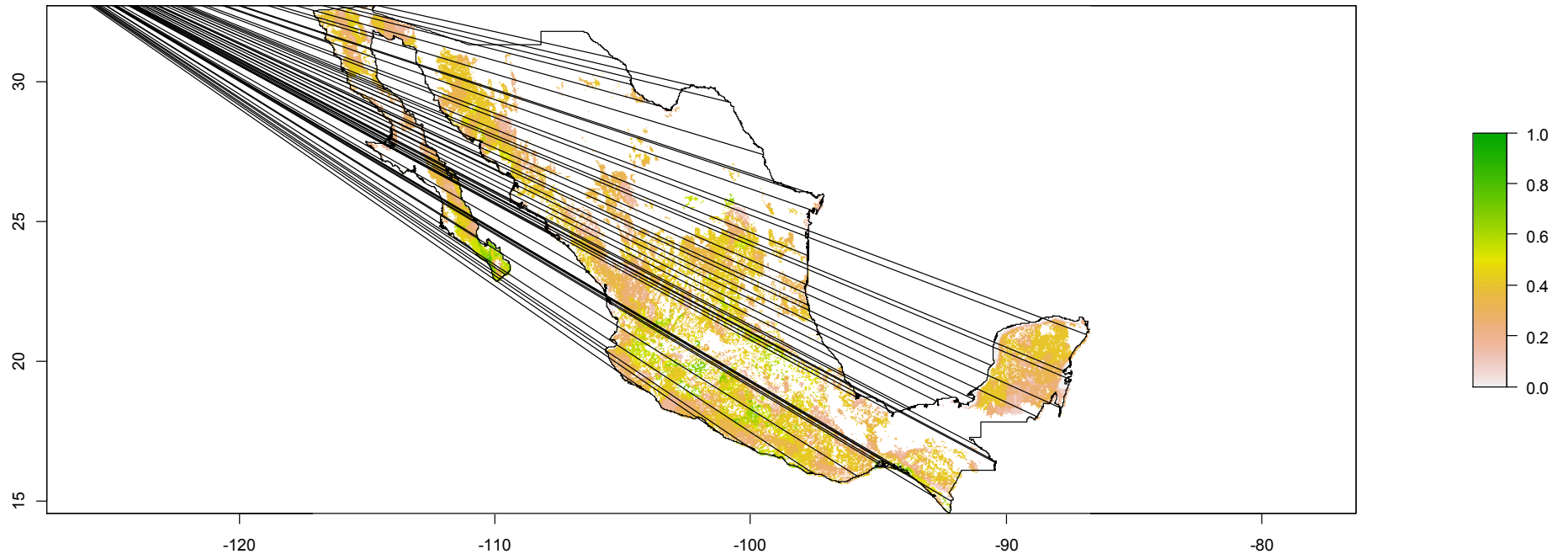


Figura 20. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario MPI_ESM_4.5_2045-2069.

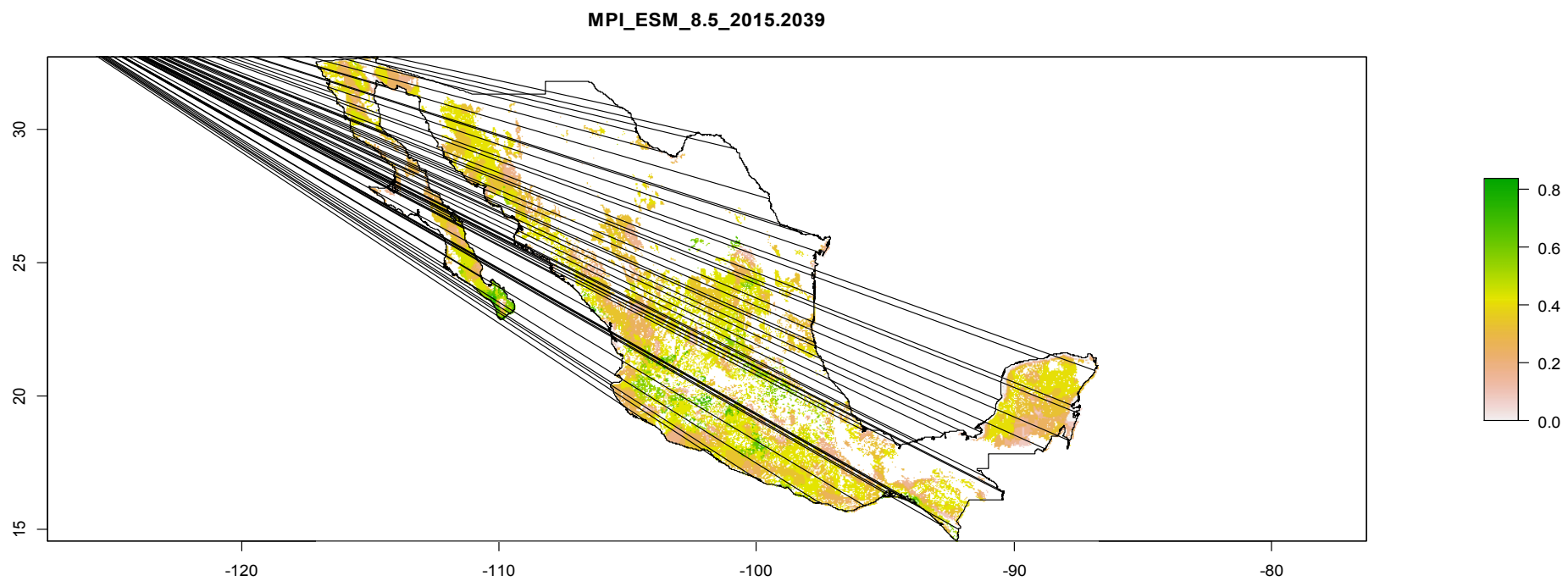


Figura 21. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario MPI_ESM_8.5_2015-2039.

MPI_ESM_8.5_2045.2069

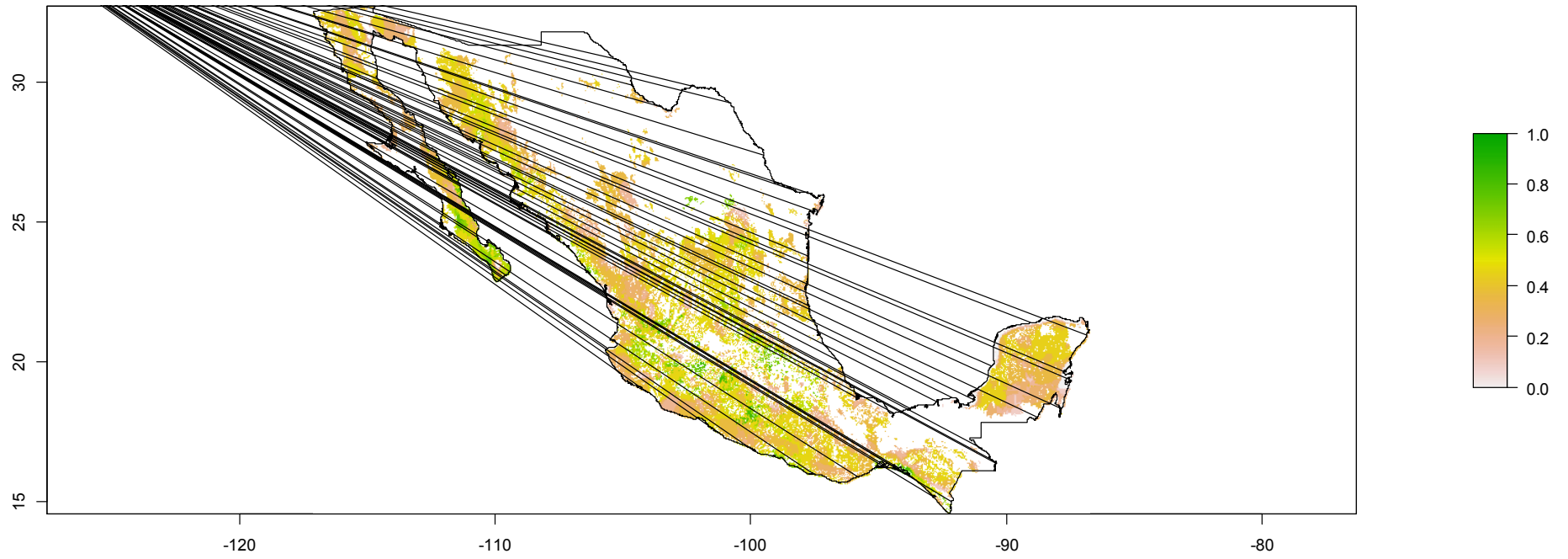


Figura 22. Vulnerabilidad de especies bajo el escenario MPI_ESM_8.5_2045-2069.

6 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El método propuesto para evaluar la vulnerabilidad de las especies bajo escenarios de cambio climático permite incorporar al análisis, con relativa seguridad, múltiples especies sin necesidad de un conocimiento profundo de su biología o apelar al juicio de experto, dada la naturaleza semiautomatizada del proceso de limpieza y puesta a punto de los datos de ocurrencias. La cantidad de especies está limitada por la disponibilidad de datos de presencias y la capacidad de cómputo instalada. Los resultados de los análisis pueden ser representados en mapas y, dados los insumos utilizados, pueden combinarse con otros análisis realizados por el INECC.

Durante la elaboración del presente estudio, se identificaron algunas áreas de oportunidad que derivaron en las siguientes recomendaciones:

Definición de capacidad adaptativa.

A diferencia de la sensibilidad y exposición, que coinciden de forma general con las diferentes aproximaciones revisadas para calcular la vulnerabilidad, la definición de capacidad adaptativa (CA) difiere sustancialmente. Por ejemplo, la CA se refiere a la capacidad de una especie o poblaciones para hacer frente al cambio climático persistiendo in situ, desplazándose a microhábitats locales más adecuados o migrando a regiones más adecuadas. Este atributo depende de una variedad de factores intrínsecos de las especies que incluyen la plasticidad fenotípica, la diversidad genética, las tasas de evolución, las características de las historias de vida, así como la capacidad de dispersión y colonización (Dawson *et al.*, 2011). El concepto elegido por la CGACC, basados en IPCC (2007) se acerca más al de manejo adaptativo (Williams *et al.*, 2008).

De acuerdo a la revisión de la literatura en revistas científicas, se propone emplear la CA como se ha planteado en el artículo de Beever *et al.* (2016), considerando que se puede hablar de dos enfoques: a) el fundamental, como los aspectos inherentes a la especie y b) el realizado, como los aspectos extrínsecos, principalmente antropogénicos, que limitan la CA fundamental. En este sentido, no se omite ninguno de los factores y permite realizar una evaluación más integral, tomando en cuenta las herramientas implementadas por el humano y haciendo énfasis en la importancia que tienen considerar la capacidad inherente a la especie.

Escala de representación de la vulnerabilidad.

Si bien la sensibilidad está asociada a elementos espaciales (por ejemplo, polígonos) con valores discretos, la exposición al cambio climático varía geográficamente dentro de las áreas de distribución de las especies debido a que los cambios proyectados en la temperatura y la precipitación se distribuyen de manera desigual (Ribeiro *et al.*, 2016). En este sentido, se propone utilizar como escala de representación la resolución y forma de las celdas que componen los rasters de la climatología actual y bajo escenarios de cambio climático.

Cantidad de escenarios.

El objetivo final deseable de los análisis de vulnerabilidad de las especies al cambio climático, es servir de insumo para la toma de decisiones en materia ambiental. Desde el punto de vista donde un tomador de decisión puede no ser experto en el tema, se torna complejo elegir una opción si se le presentan tantas como escenarios de cambio climático se hayan incorporado al análisis. Por ello, se propone la selección de un solo escenario bajo algún criterio consensuado, por ejemplo, el más catastrófico para la presentación y difusión de la vulnerabilidad.

Otras consideraciones.

El método propuesto adolece de muchas de las limitaciones y se encuentra bajo los supuestos asociados a las técnicas de modelado de distribución de especies y nicho ecológico.

La aproximación utilizada sólo incluye variables abióticas para describir las distribuciones de las especies y, por consiguiente, su sensibilidad. Sin embargo, variables bióticas como las interacciones biológicas influyen en los nichos realizados de las especies (Davis *et al.*, 1998).

Dada la forma seleccionada para calcular la exposición (ExDet), es necesario tener en cuenta que evaluar si los nichos fundamentales de las especies se extienden hacia regiones del espacio ambiental no observadas en la actualidad, es una tarea complicada. Un nicho realizado en un momento dado puede representar únicamente un subconjunto de las condiciones climáticas en las que una especie puede persistir (Veloz *et al.*, 2012); en algunos casos, las especies pueden ocupar nichos climáticos diferentes después de ser introducidas a nuevas áreas (Broennimann *et al.*, 2007).

7 LITERATURA CITADA

- Bagne, K. E., Friggens, M. M., Coe, S. J., y Finch, D. M. (2014), "The importance of assessing climate change vulnerability to address species conservation", en *Journal of Fish and Wildlife Management*, 5(2), 450-462.
- Barrows, C. W., Hoines, J., Fleming, K. D., Vamstad, M. S., Murphy-Mariscal, M., Lalumiere, K., y Harding, M. (2014), "Designing a sustainable monitoring framework for assessing impacts of climate change at Joshua tree national park, USA", en *Biodiversity and Conservation*, 23(13), 3263-3285.
- Beever, E. A., O'Leary, J., Mengelt, C., West, J. M., Julius, S., Green, N., ... y Hellmann, J. J. (2016). "Improving conservation outcomes with a new paradigm for understanding species' fundamental and realized adaptive capacity", en *Conservation Letters*, 9(2), 131-137.
- Botello, F., Sánchez-Cordero, V., Pérez-Cirera, V., Villaseñor, E., Escobar, E., Rhodes, A., Vidal, O. y Bellot, M. (en revisión), "Designing optimal conservation area networks under climate change", en *Diversity and Distributions*.
- Botello F., V. Sánchez-Cordero, V. Pérez-Cirera, E. Villaseñor, N. Escobar, A. Rhodes, O. Vidal, y M. Bellot (2017), Recuadro 1. Áreas Prioritarias para la Conectividad Ecológica ante el Cambio Climático, en Botello-López F., E. Platas-Valle, M. González-Delgado, M. E. Vega-Orihuela y E. Villaseñor-Sánchez, Evaluación de la factibilidad para la implementación de conectores ecológicos. Caracterización y recomendaciones de manejo para cuatro complejos de conservación. Conservación Biológica y Desarrollo Social, A. C. (CONBIODES). Instituto de Biología, UNAM. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Alianza World Wildlife Fund-Fundación Carlos Slim (WWF-FCS), Ciudad de México, México.
- Botello, F., V. Sánchez-Cordero y A. Ortega-Huerta (2015), "Disponibilidad de hábitats adecuados para especies de mamíferos a escalas regional (estado de Guerrero) y nacional (México)", en *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 226-237.
- Broennimann, O., Treier, U. A., Müller-Schärer, H., Thuiller, W., Peterson, A. T., y Guisan, A. (2007). "Evidence of climatic niche shift during biological invasion", en *Ecology Letters*, 10(8), 701-709.
- Broennimann Oliver, Blaise Petitpierre, Christophe Randin, Robin Engler, Valeria Di Cola, Frank Breiner, Manuela D'Amen, Loic Pellissier, Julien Pottier, Dorothea Pio, Ruben Garcia Mateo, Wim Hordijk, Anne Dubuis, Daniel Scherrer, Nicolas Salamin y Antoine Guisan (2015). *ecospat: Spatial Ecology Miscellaneous Methods*. R package version 1.1. <http://CRAN.R-project.org/package=ecospat>.
- Bush, A. A., Nipperess, D. A., Duursma, D. E., Theischinger, G., Turak, E., y Hughes, L. (2014), "Continental-scale assessment of risk to the Australian Odonata from climate change", en *PLoS one*, 9(2), e88958.
- Carr, J. A., Hughes, A. F., & Foden, W. B. (2014), "A climate change vulnerability assessment of West African species", UNEP-WCMC technical report.

- Challenger, A. y J. Soberón (2008), Los ecosistemas terrestres, en J. Soberón, G. Halfter y J. Llorente-Bousquets (coords) Capital natural de México, volumen 1: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, recuperado de http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20I/I03_Losecosistemast.pdf
- CONANP-FMCM-TNC. (2011), “Guía para la elaboración de programas de adaptación al cambio climático en áreas naturales protegidas”, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.-The Nature Conservancy, México. Pp. 51, recuperado de <http://cambioclimatico.conanp.gob.mx/documentos/guia-elab-programas-cc-en-anp.PDF>
- Cooney, R. (2004), “The precautionary principle in biodiversity conservation and natural resource management”, en IUCN Policy and Global Change Series No. 2, Glanc, Switzerland and Cambridge, UK, recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.365.1209&rep=rep1&type=pdf>
- Davis, A. J., Jenkinson, L. S., Lawton, J. H., Shorrocks, B., y Wood, S. (1998). “Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming”, en *Nature*, 391(6669), 783-786.
- Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C., y Mace, G. M. (2011), “Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate”, en *Science*, 332(6025), 53-58.
- DOF. (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”, en *Diario Oficial de la Federación*, recuperado de http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf
- DOF (2013), “Acuerdo por el que se expide al Estrategia Nacional de Cambio Climático”, en *Diario Oficial de la Federación* 03-06-2013. Secretaría de Gobernación, recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013
- DOF (2016), “Ley general de cambio climático”, en *Diario Oficial de la Federación*, última reforma 01-06-2016. Secretaría de Gobernación, recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_010616.pdf
- DOF (2014), “Acuerdo por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación”, en *Diario Oficial de la Federación*. Secretaría de Gobernación, recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5334865&fecha=05/03/2014
- Eguiguren-Velepucha, P. A., Chamba, J. A. M., Aguirre Mendoza, N. A., Ojeda-Luna, T. L., Samaniego-Rojas, N. S., Furniss, M. J., . . . Aguirre Mendoza, Z. H. (2016), “Tropical ecosystems vulnerability to climate change in southern Ecuador”, en *Tropical Conservation Science*, 9(4).
- Elith, J., Kearney, M. y Phillips, S. (2010), “The art of modelling range-shifting species”, en *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330--342.
- Feria, T. P., Sánchez-Rojas, G., Ortíz-Pulido, R., Braco-Cadena, J., Calixto, E., Dale, J. M., ...y Valencia-Herverth, J. (2013), “Estudio del cambio climático y su efecto en las aves en México: enfoques actuales y perspectivas futuras, en *Huitzil*, 14(1), 47-55.

- Foden, W. B., Butchart, S. H. M., Stuart, S. N., Vié, J. -, Akçakaya, H. R., Angulo, A., . . . Mace, G. M. (2013), "Identifying the world's most climate change vulnerable species: A systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals", en *PLoS ONE*, 8(6).
- Foden, W.B. and Young, B.E. (eds.) (2016), "IUCN SSC Guidelines for Assessing Species' Vulnerability to Climate Change. Version 1.0", en *Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission* No. 59. Cambridge, UK and Gland, Switzerland:IUCN Species Survival Commission.
- Hagger, V., Fisher, D., Schmidt, S., y Blomberg, S. (2013), "Assessing the vulnerability of an assemblage of subtropical rainforest vertebrate species to climate change in south-east queensland", en *Austral Ecology*, 38(4), 465-475.
- Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra, J. L.; Jones, P. G. Y Jarvis, A. (2005), "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas", en *International journal of climatology* 25(15), 1965--1978.
- Hijmans, R. J. (2012), "Cross-validation of species distribution models: removing spatial sorting bias and calibration with a null model", en *Ecology*, 93(3), 679-688.
- Hijmans, R. J.; Steven Phillips, John Leathwick y Jane Elith (2015), "dismo: Species Distribution Modeling", R package version 1.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>.
- Holt, R. D. (1990), "The microevolutionary consequences of climate change", en *Trends in Ecology & Evolution* 5(9), 311--315.
- INECC. (2012), "Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático". Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, D.F. Pp. 61.
- INEGI. (2013), "Datos vectoriales escala 1:250 000. Uso de suelo y vegetación, México", recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/ususuelo/default.aspx>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland
- IPCC. (2013), "What is a gcm?", recuperado de http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC. (2007), "Climate Change. Impact, Adaptation and Vulnerability", Fourth Assessment Report (AR4).
- Liu, C.; Berry, P. M.; Dawson, T. P. y Pearson, R. G. (2005), "Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions", en *Ecography* 28(3), 385--393.
- Liu, C.; White, M. y Newell, G. (2011), "Measuring and comparing the accuracy of species distribution models with presence-absence data", en *Ecography* 34(2), 232--243.
- Mamauag, S. S., Aliño, P. M., Martinez, R. J. S., Muallil, R. N., Doctor, M. V. A., Dizon, E. C., . . . Cabral, R. B. (2013), "A framework for vulnerability assessment of coastal fisheries ecosystems to climate

- change-tool for understanding resilience of fisheries (VA-TURF)", en *Fisheries Research*, 147, 381-393.
- Meng, H., Carr, J., Beraducci, J., Bowles, P., Branch, W. R., Capitani, C., . . . Burgess, N. D. (2016), "Tanzania's reptile biodiversity: Distribution, threats and climate change vulnerability", en *Biological Conservation*, 204, 72-82.
- Mesgaran, M. B., Cousens, R. D. y Webber, B. L. (2014), "Here be dragons: a tool for quantifying novelty due to covariate range and correlation change when projecting species distribution models", en *Diversity and Distributions*, 20(10), 1147--1159.
- Monterroso R. A., A. Fernández E., R. I. Trejo V., A. C. Conde A., J. Escandón C., L. Villers R. y C. Gay G. (2014), "Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México". Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático Universidad Nacional Autónoma de México, recuperado de <http://atlasclimatico.unam.mx/VyA>
- Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., y Anderson, R. P. (2014), "ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models", en *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198-1205.
- Parmesan, C. (2006), "Ecological and evolutionary responses to recent climate change", en *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 37, 637-669
- Phillips, S. J.; Anderson, R. P. y Schapire, R. E. (2006), "Maximum entropy modeling of species geographic distributions", en *Ecological modelling* 190(3), 231--259.
- R Core Team (2014), "R: A language and environment for statistical computing", R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, recuperado de <http://www.R-project.org/>.
- Razgour, O., Taggart, J. B., Manel, S., Juste, J., Ibáñez, C., Rebelo, H., ... y Park, K. (2017), "An integrated framework to identify wildlife populations under threat from climate change", *Molecular Ecology Resources*.
- Reside, A. E., VanDerWal, J., Garnett, S. T., y Kutt, A. S. (2016), "Vulnerability of Australian tropical savanna birds to climate change", en *Austral ecology*, 41(1), 106-116.
- Ribeiro, B. R., Sales, L. P., De Marco Jr, P., y Loyola, R. (2016), "Assessing Mammal Exposure to Climate Change in the Brazilian Amazon", en *PloS one*, 11(11), e0165073.
- Sánchez-Cordero, V., V. Cirelli, M. Munguía y S. Sarkar (2005a), "Place prioritization for biodiversity representation using especies' ecological niche modeling", en *Biodiversity Informatics*, 2, 11-23.
- Sánchez-Cordero, V., P. Iloldi-Rangel, M. Linaje, S. Sarkar y A. T. Peterson (2005b), "Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals", en *Biological Conservation*, 126(4), 465-473.

- Sánchez-Cordero, V., P. Iloldi-Rangel, T. Escalante, F. Figueroa, G. Rodríguez, M. Linaje, ... y S. Sarkar (2009), "Deforestation and biodiversity conservation in Mexico", en *Endangered species, new research*, 279-298.
- Sánchez-Cordero, V., P. Iloldi-Rangel y M. Linaje (2012), "Identificación de áreas prioritarias para la conservación y su conectividad bajo diferentes escenarios de cambio climático: base para el diseño de áreas naturales protegidas". Informe final, recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/con_eco/2012_identific_areas_prioritarias_cc.pdf.
- Scheffers, B. R., Brunner, R. M., Ramirez, S. D., Shoo, L. P., Diesmos, A., y Williams, S. E. (2013), "Thermal buffering of microhabitats is a critical factor mediating warming vulnerability of frogs in the Philippine biodiversity hotspot", *Biotropica*, 45(5), 628-635.
- SEMARNAT. (2013), "Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40", Gobierno de la República. México, D.F.
- Soberón J y Peterson AT, (2005), "Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas", en *Biodiversity Informatics*, 2:1-10.
- Stanley, L. G. y C. MacCracken, M. (1991), "The use of General Circulation Modelos to Predict Regional Climatic Change", en *Journal of Climate*, volume 4.
- Thuiller, W., Lavorel, S., y Araújo, M. B. (2005), "Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change", en *Global Ecology and Biogeography*, 14(4), 347-357.
- Veloz, S. D., Williams, J. W., Blois, J. L., He, F., Otto-Bliesner, B., y Liu, Z. (2012), "No-analog climates and shifting realized niches during the late quaternary: implications for 21st-century predictions by species distribution models", en *Global Change Biology*, 18(5), 1698-1713.
- Venette, R. C. (2017), "Climate Analyses to Assess Risks from Invasive Forest Insects: Simple Matching to Advanced Models", en *Current Forestry Reports*, 1-14.
- Williams, J. W., y Jackson, S. T. (2007). Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(9), 475-482.
- Williams, S. E., Shoo, L. P., Isaac, J. L., Hoffmann, A. A., y Langham, G. (2008), "Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change", en *PLoS biology*, 6(12), e325.
- Zurell, D., Elith, J., y Schröder, B. (2012), "Predicting to new environments: tools for visualizing model behaviour and impacts on mapped distributions", en *Diversity and Distributions*, 18(6), 628-634.