

Apéndice 55. Metodología empleada para el análisis de vulnerabilidad de especies ante el cambio climático.

Revisión documental

Se compilaron diversos documentos: planes nacionales de adaptación de las entidades federales encargadas del sector ambiental federal mexicano (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)), de los programas estatales de acción frente al cambio climático generados recientemente y artículos científicos de relevancia.

Se realizó una búsqueda exhaustiva de los listados de flora y fauna con distribución en el territorio estatal, su estatus de conservación en listas nacionales (NOM-059-SEMARNAT-2010) e internacionales (Lista Roja de la UICN; SEMARNAT 2010, UICN 2017), así como toda la información de usos y bases de datos de los registros de presencia de especies dentro de Morelos.

Finalmente, se revisó la información biológica (tanto de especies nativas como exóticas) y la técnica-administrativa (delimitación cartográfica, amenazas, fortalezas y debilidades) de las especies con algún grado de protección vía áreas naturales protegidas y otros ecosistemas protegidos en el estado (con administración federal, estatal o municipal indistintamente).

Selección de especies

Se seleccionaron las especies que cumplieran con alguno de los siguientes criterios: 1) propuestas como especies prioritarias a nivel nacional, con algún grado de amenaza según la NOM-059-SEMARNAT-2010 en México; 2) con algún valor e interés socioeconómico y cultural tanto

la especie misma, como su hábitat; 3) con importancia internacional; 4) con importancia estratégica como especie sombrilla para la conservación de otras especies y su hábitat; 5) con importancia estratégica como especie indicadora para la conservación de otras especies y su hábitat; 6) con importancia estratégica como especie clave para la conservación de otras especies y su hábitat; 7) con importancia estratégica como especie bandera para la conservación de otras especies y su hábitat; 8) rarezas taxonómicas; 9) con algún conflicto humano-vida silvestre; 10) con estructura poblacional compleja; 11) sujetas a presión antropogénica; 12) con viabilidad de uso sustentable; 13) con viabilidad de recuperación; 14) por su presencia en áreas naturales protegidas; 15) por su hábitat regional; 16) por su grado de interés cultural y científico; y 17) por tratarse de linajes evolutivos únicos y con endemismos para México y Morelos.

Con estos criterios se obtuvo una lista de 73 especies de flora y fauna.

Elaboración y análisis de modelos de distribución potencial

Se elaboraron modelos de nicho ecológico con el auxilio de especialistas del Laboratorio de sistemas de información geográfica del Instituto de Biología de la UNAM.

El paquete computacional MaxEnt (Phillips *et al.* 2004) se utilizó para proyectar los modelos como distribuciones potenciales de una muestra representativa de 73 especies.

Para modelar la distribución actual de las especies, se utilizaron 19 coberturas ambientales a una resolución de 0.01° x 0.01°, derivadas de la plataforma de información en línea WorldClim 1.3 (Hijmans *et al.* 2005, Fick y

Hijmans 2017). Dichas coberturas incluyeron parámetros climáticos tales como precipitación media anual, precipitación diaria máxima y mínima, temperatura diaria máxima y mínima y temperatura media anual.

Los datos de presencia de especies se obtuvieron de colecciones científicas tanto nacionales como internacionales, todos georreferenciados.

Los modelos de nicho ecológico de las especies de vertebrados seleccionadas fueron proyectados a las condiciones actuales, y a los años 2020, 2050 y 2080. Para tales proyecciones se utilizó el escenario de cambio climático del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) SRES A2 del Canadian Centre for Climate Modelling Analyst (CGCM2).

Procesamiento, sistematización y análisis de información

Para la determinación de la vulnerabilidad de las especies y de los ecosistemas, se llevó a cabo un análisis de la información generada por la modelación de la distribución de especies definiendo tres ámbitos: su riesgo de exposición, su vulnerabilidad intrínseca y su capacidad de adaptación.

Para obtener la valoración de la vulnerabilidad total se definió una importancia relativa con una ponderación a cada ámbito (cuadro A1).

Los pesos relativos de los ámbitos y criterios se definieron *a priori* y en función de los propósitos del análisis.

Se empleó una escala de cuatro valores con 4 el máximo y 1 el mínimo. Esta escala permitió distinguir claramente un polo del otro, en donde los valores máximos resultantes de la sumatoria representaron una mayor vulnerabilidad y los mínimos una menor vulnerabilidad. A continuación, se describen los criterios para la definición de cada ámbito y su asignación de valores:

Riesgo de exposición: se encuentra relacionado con la variabilidad climática (aumentos de temperatura,

Cuadro 1. Ponderación de los ámbitos para la determinación de la vulnerabilidad total.

Ámbito	Ponderación
Riesgo de exposición	2
Vulnerabilidad intrínseca	3
Capacidad de adaptación	-1

Fuente: elaboración propia.

cambios en la precipitación, cambios en los patrones de las temporadas, tormentas y huracanes) y los posibles efectos en la distribución espacial del objeto de estudio (especies, taxa, ecosistemas, entre otros), en periodos de tiempo previamente establecidos.

Para calificar el riesgo de exposición se utilizaron los siguientes criterios según la reacción del objeto de estudio: incrementa su distribución, permanece en el estado actual, se fragmenta su distribución o se decrece su distribución.

Para el análisis de esta característica, se tomaron en cuenta los modelos de distribución generados durante este trabajo, donde se estableció una comparativa relativa entre las distribuciones de los modelos para 2013, 2020, 2050 y 2080.

Vulnerabilidad intrínseca: se define como el conjunto de características propias de especies y ecosistemas, que pudieran incidir y magnificar los efectos que tenga el cambio climático en sus características ecológicas, entre las que destacan su sobrevivencia, la situación de sus poblaciones y las comunidades presentes (cuadro A2).

Capacidad de adaptación: se tomaron en cuenta características propias de las especies y de los sistemas que pueden atenuar o disminuir los efectos del cambio climático sobre éstos (cuadro A3).

Vulnerabilidad total: Como resultado de la sumatoria de las tres medidas (riesgo de exposición, vulnerabilidad intrínseca y capacidad de adaptación) se obtuvo la vulnerabilidad total (cuadro A4).

Cuadro 2. Criterios para calificar la vulnerabilidad intrínseca.

ID	Criterios
1	Concatenación con vínculos ecológicos: la especie o sistema muestran dependencia a relaciones interespecíficas o vínculos ecológicos que es posible que se interrumpan o cambien debido al cambio climático. Algunas de estas relaciones pueden ser: presas, depredadores, forraje, parásitos, plantas hospederas, polinizadores, dispersores de semillas, simbiosis, protocooperación, mutualismo
2	Vagilidad baja: pobre habilidad de dispersión o colonización a nuevos ambientes apropiados. La habilidad de dispersión puede hacer a las especies más o menos susceptibles a los efectos adversos del cambio climático
3	Situación o grado de amenaza: aquí se considera si la especie está incluida bajo algún régimen de protección, p.e. la NOM-059-SEMARNAT-2010 en México, o su presencia en la Lista Roja de la UICN o bien su condición de especie indicadora, clave o su rareza taxonómica por ser linajes evolutivos únicos.
4	Endemismo: especie endémica del estado o de la región se privilegia su condición de endémica a Morelos de ser el caso
5	Dispersión y densidad: que ocupen espacios pequeños y con bajas densidades de población
6	Tolerancia o valencia ecológica: campo o intervalo de tolerancia de una determinada especie respecto a un factor cualquiera del medio (como pueden ser la luz, la temperatura, la humedad, el pH o la concentración de fósforo, nitrógeno u otro elemento químico) que actúa como factor limitante. En particular se hace referencia a la tolerancia a pulsos extremos, de exceso o descenso de temperatura, de exceso o falta de agua por periodo prolongado, así como incendios o afectaciones recurrentes, por mencionar algunos ejemplos. Tolerancias ambientales cercanas o umbrales que sea posible exceder debido al cambio climático (particularmente por pulsos extremos) en cualquier estadio en su ciclo de vida. A nivel ecosistema, que se rebasen los umbrales de riesgo crítico de los ecosistemas, donde el rango de tolerancia depende de la vulnerabilidad de cada sistema
7	Resiliencia: capacidad de un sistema para retornar a las condiciones previas a la perturbación. En ecología de comunidades y ecosistemas, el término resiliencia indica la capacidad de las comunidades (mono o multispecíficas) de absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características de estructura y funcionalidad, de tal manera que puedan regresar a su estado original una vez que la perturbación ha terminado. En ese sentido, se observa que comunidades o ecosistemas más complejos (que poseen mayor número de interacciones entre sus partes, por ser más biodiversas), suelen poseer resiliencias mayores ya que existe una mayor cantidad de mecanismos autoreguladores. La capacidad de resiliencia de un ecosistema está directamente relacionada con la riqueza de especies y el traslado de las funciones ecológicas que éstas tengan. Es decir que un sistema en el cual sus integrantes tengan más diversidad y número de funciones ecológicas será capaz de soportar de mejor manera una perturbación específica. Flujos, agua, energía, nutrientes, elementos: a nivel ecosistémico cambio en su estructura y función, desacoplamiento o descomposición flujos del agua o de ciclos de nutrientes
8	Presencia comparativa: se refiere a si el taxón relativamente común fuera de la región y no existen signos de disminución de la población, y si el taxón es capaz de dispersarse en la región y hay (o pronto habrá) un hábitat disponible. Si el taxón, por el contrario, actualmente está disminuyendo en las regiones vecinas, es menos probable que ocurra el efecto de rescate. ¿Está el taxón muy disperso globalmente?
9	Dependencia de fuentes extrarregionales: se refiere a si las poblaciones regionales existentes son autosostenibles con una tasa positiva de reproducción a lo largo de los años, o son dependientes de la inmigración para su supervivencia a largo plazo (es decir, las poblaciones regionales son sumideros)
10	Grado de especialización: especialización al hábitat y/o a los requerimientos de microhábitat de las especies o del sistema. Es más probable que las especies con hábitat generalizado o con requerimientos de hábitat no especializados toleren mayores niveles en el cambio climático que las especies especializadas. Las especies eurioicas son aquellas que se caracterizan por ser poco exigentes respecto a los valores alcanzados por un determinado factor, o lo que es lo mismo, sus valencias ecológicas registran una gran amplitud. A pesar de esto, el número máximo de individuos no acostumbra a ser muy elevado. En contraste, las especies estenoicas son aquellas que son muy exigentes respecto a los valores alcanzados por un determinado factor, o lo que es lo mismo, sus límites de tolerancia son estrechos. Sin embargo, si se desarrollan bajo unas condiciones óptimas, el número de individuos puede llegar a ser elevado.
11	Estrategia reproductiva: esta característica también puede hacer a una especie sensible al cambio climático. Algunos estudios sugieren que las especies con tiempos de generación largos y menos crías (estrategia k) son más propensas a tener un mayor riesgo de extinción por el cambio climático a largo plazo, que aquellas cuya historia de vida se caracteriza por tiempos cortos de generación y muchas crías (estrategia r). Las especies eurioicas suelen ser r estrategias (individuos con un potencial biótico elevado, que tienen muchas crías que no reciben cuidados), y consecuentemente, son generalistas, mientras que las especies estenoicas suelen ser k estrategias (individuos con una tasa de natalidad baja, que le proporcionan a sus crías muchos cuidados hasta alcanzar la edad adulta), y como consecuencia, son especialistas
12	Dependencia a disparadores específicos: dependencia a señales que pueden ser interrumpidas o variar por el cambio climático. Muchas especies dependen de dichos factores ambientales como la aparición de la primavera y una serie de otros procesos esenciales como señales para la migración, la floración, la reproducción, la puesta de huevos, la germinación de semillas, la hibernación, etcétera
13	Composición e interacciones a nivel ecosistémico: cambio en la estructura y función, desacoplamiento o descomposición de conjuntos de especies y sus interacciones, cambios a nivel ecosistémico en su estructura y función, en su distribución dentro de los paisajes
14	Singularidad: presencia de especies con características poblacionales singulares, concretamente especies migratorias, congregatorias o de estructura poblacional compleja

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3. Criterios utilizados para calificar la capacidad de adaptación.

ID	Criterios
1	Disponibilidad del hábitat apropiado: responde a la pregunta: ¿las condiciones actuales del hábitat y/u otros requerimientos ambientales (incluyendo climatológicos) del taxón en la región son tales que los propágulos inmigrantes son capaces de establecerse con éxito (es decir, hay espacios habitables) o han llevado a la desaparición del taxón en la región debido a condiciones desfavorables? Si no hay suficiente hábitat adecuado y las actuales medidas de conservación no conducen a un mejoramiento del hábitat dentro de un futuro previsible, la inmigración desde fuera de la región no disminuirá el riesgo de extinción
2	Fragmentación: significa que los hábitats de las especies alcanzan un alto grado de dispersión a lo largo de su distribución. Un alto grado de fragmentación puede traducirse en aislamiento y hacer a las poblaciones inviables
3	Presión antropogénica: exposición a presiones de origen humano, cómo el cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal, que tengan algún valor económico. Que las especies estén expuestas a presiones del uso humano, cómo el cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal, o bien a presión antropogénica. Especies sometidas a alta presión antropogénica, un uso por su valor socioeconómico y cultural. Interés socioeconómico de la especie y su hábitat, privilegiando especies o grupos con alto grado de interés cultural y científico.
4	Conflictos humano-vida silvestre: ocurrencia, frecuencia e importancia relativa de conflictos entre humanos y la especie o grupo en cuestión. Complementariamente viabilidad de uso especies o grupos con viabilidad de su aprovechamiento sustentable.
5	Probabilidad de la migración por propágulos: responde a las preguntas ¿Hay poblaciones coespecíficas fuera de la región a una distancia tal que los propágulos podrían alcanzar la región? ¿Es la población regional parte de una metapoblación mayor que comprende sectores extrarregionales? ¿Existen barreras efectivas que eviten la dispersión desde y hacia las poblaciones vecinas? ¿El taxón es capaz de dispersiones a larga distancia? ¿Se sabe que lo hace? Si no hay poblaciones coespecíficas en las regiones vecinas o si los propágulos no son capaces de dispersarse hacia la región, la población regional se comporta como una población endémica.
6	Evidencia de la existencia de adaptaciones locales: responde a la pregunta ¿Existen diferencias conocidas que reflejen las adaptaciones locales entre las poblaciones regionales y extrarregionales (es decir, ¿es probable que los individuos de las poblaciones extrarregionales puedan sobrevivir dentro de la región y los individuos de las poblaciones regionales puedan en su caso sobrevivir fuera de la región?).
7	Respuestas adaptativas -potencial (específico-taxa-ecosistémico) de respuestas adaptativas de comportamiento, potencial (específico-taxa-ecosistémico) de respuestas adaptativas fisiológicas/fenológicas, potencial (específico-taxa-ecosistémico) de respuestas adaptativas genéticas, potencial (específico-taxa-ecosistémico) de respuestas adaptativas migración, potencial (específico-taxa-ecosistémico) de respuestas adaptativas cambios demográficos (dentro de la distribución geográfica).
8	Estado de poblaciones extrarregionales (calidad): ¿Cuán abundante es el taxón en las regiones vecinas? ¿Estas poblaciones son estables, aumentan o disminuyen? ¿Existen amenazas importantes para estas poblaciones? ¿Es probable que las mismas produzcan una apreciable cantidad de emigrantes y continúen haciéndolo en el futuro previsible?
9	Condiciones del medio ambiente fuera de la región: responde a la pregunta ¿Se está deteriorando el hábitat u otras condiciones del taxón, o se proyecta que esto puede ocurrir, en el área de reproducción o en otras áreas de las que el taxón utiliza recursos? Si la respuesta es sí, el taxón experimentará una reducción o disminución continua, actual o proyectada.
10	Condiciones del medio ambiente dentro de la región: responde a la pregunta ¿Se está deteriorando el hábitat u otras condiciones del taxón, o se proyecta que esto puede ocurrir, dentro de la región? Si la respuesta es sí, el taxón experimentará una reducción o disminución continua, actual o proyectada.
11	Reclutamiento potencial: si la población en condiciones de reproducirse es bastante grande y no se están deteriorando las condiciones dentro o fuera de la región, la posibilidad de una extinción regional es menos probable y las probabilidades de reclutamiento más altas.
12	Sinergia factorial: la existencia de otros factores de estrés tiene el potencial de exacerbar los efectos del cambio climático sobre los individuos y poblaciones. Por ejemplo, la exposición a contaminantes tales como metales pesados, petróleo, pesticidas y otros contaminantes.
13	Viabilidad de recuperación: especies o grupos con mayor viabilidad relativa de recuperación (relativo a su resiliencia, mayor vagilidad u otros atributos particularmente útiles en escenarios adversos de cambio climático).
14	Presencia en ANP: presencia de la especie o del ecosistema en áreas naturales protegidas (federal o estatal, privadas, ejidales, incluso UMA u otra modalidad) que impongan cierto grado de protección relativa.
15	Otra condición del contexto que haga suponer que la capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático de la especie-taxón-ecosistema en cuestión será alta.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro A4. Rangos de los valores máximos y mínimos en vulnerabilidad total.

Rangos	Vulnerabilidad
1-5	Menor
5-10	
10-15	
15-20	Mayor

Fuente: elaboración propia.

Referencias

- Fick, S.E. y R.J. Hijmans. 2017. WorldClim Version 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. En: <<http://worldclim.org/version2>>, última consulta: 13 de julio de 2018.
- Hijmans, R., S. Cameron, J. Parra *et al.* 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15): 1965–1978.
- Phillips, S., M. Dudik y R. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. En: *Proceedings of the 21st international conference on machine learning*. I. Bratko y S. Dzeroski (eds). ACM Press, Nueva York, pp. 655-662.
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010*. Publicada el 30 de diciembre de 2010 en el Diario Oficial de la Federación. Texto vigente.
- UICN. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. 2017. *Lista Roja de especies amenazadas de la uicn. Versión 2017.1*. En: <<http://www.iucnredlist.org/>>, última consulta: 11 de julio de 2017.