

# Ecosistemas, servicios ecosistémicos y biodiversidad



# Capítulo 8. Ecosistemas, servicios ecosistémicos y biodiversidad

## Autores y colaboradores

### Autor principal de coordinación federal

**Shawn L. Carter**, US Geological Survey, National Climate Adaptation Science Center

### Autor principal del capítulo

**Pamela D. McElwee**, Rutgers University

### Autores principales del capítulo de la agencia

**Kimberly J. W. Hyde**, NOAA Fisheries, Northeast Fisheries Science Center

**Jordan M. West**, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development

### Autores del capítulo

**Kofi Akamani**, Southern Illinois University Carbondale

**Amanda L. Babson**, US National Park Service

**Gillian Bowser**, Colorado State University

**John B. Bradford**, US Geological Survey, Southwest Biological Science Center

**Jennifer K. Costanza**, USDA Forest Service

**Theresa M. Crimmins**, University of Arizona, USA National Phenology Network

**Sarah C. Goslee**, USDA Agricultural Research Service

**Stephen K. Hamilton**, Cary Institute of Ecosystem Studies

**Brian Helmuth**, Northeastern University

**Serra Hoagland**, USDA Forest Service

**Fushcia-Ann E. Hoover**, University of North Carolina at Charlotte

**Mary E. Hunsicker**, NOAA Fisheries, Northwest Fisheries Science Center

**Roxolana Kashuba**, US Environmental Protection Agency

**Seth A. Moore**, Grand Portage Band of Lake Superior Chippewa

**Roldan C. Muñoz**, NOAA Fisheries, Southeast Fisheries Science Center

**Gyami Shrestha**, Lynker

**Maria Uriarte**, Columbia University

**Jennifer L. Wilkening**, US Fish and Wildlife Service

### Contribuyentes técnicos

**Nazia N. Arbab**, Rutgers University

**Danielle Cholewiak**, NOAA Fisheries, Northeast Fisheries Science Center

**Pranay Kumar**, Rutgers University

**Victor O. Leshyk**, Northern Arizona University

**Katherine C. Malpeli**, US Geological Survey, National Climate Adaptation Science Center

**Richard S. Ostfeld**, Cary Institute of Ecosystem Studies

**GraceAnne K. Piselli**, Northeastern University

**José R. Ramírez-Garofalo**, Rutgers University

**Edward A.G. Schuur**, Northern Arizona University

**Jacquelyn Veatch**, Rutgers University

**Sarah Whipple**, Colorado State University

**Sauvanithi Yupho**, Rutgers University, Department of Geography

### Editor revisor

**Abigail York**, Arizona State University

### Arte de apertura de capítulo

**Taelyn B.**

### Cita recomendada

McElwee, P.D., S.L. Carter, K.J.W. Hyde, J.M. West, K. Akamani, A.L. Babson, G. Bowser, J.B. Bradford, J.K. Costanza, T.M. Crimmins, S.C. Goslee, S.K. Hamilton, B. Helmuth, S. Hoagland, F.-A.E. Hoover, M.E. Hunsicker, R. Kashuba, S.A. Moore, R.C. Muñoz, G. Shrestha, M. Uriarte, and J.L. Wilkening, 2023: Cap. 8. Ecosistemas, servicios ecosistémicos y biodiversidad. En: *La Quinta Evaluación Nacional del Clima*. Crimmins, A.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, B.C. Stewart, and T.K. Maycock, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH8.ES>

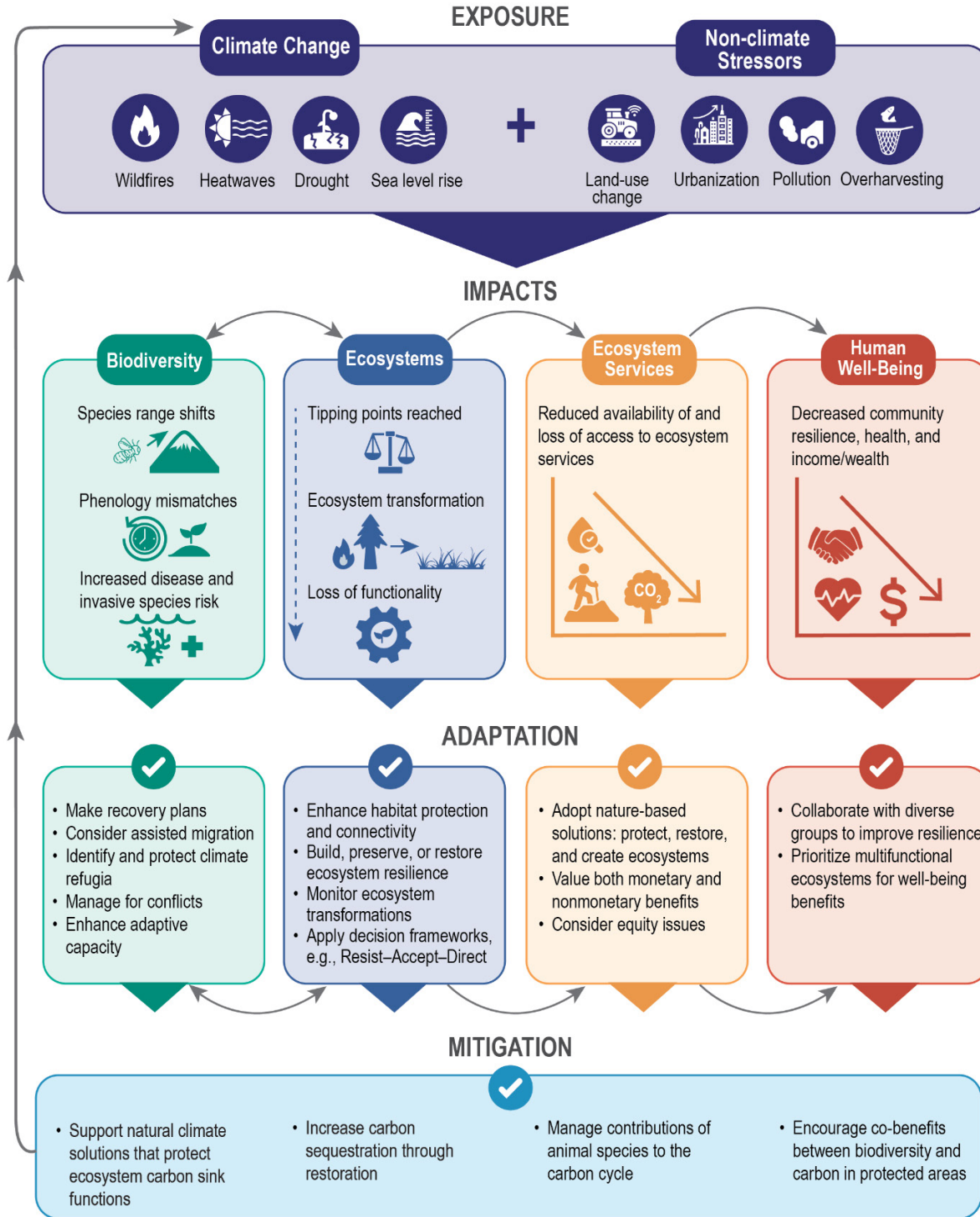
# Índice de Contenidos

<b>Introducción .....</b>	<b>5</b>
Mensaje clave 8.1	
<b>El cambio climático está provocando rápidas transformaciones en los ecosistemas.....</b>	<b>10</b>
Seguimiento de las transformaciones .....	13
Afrontar los riesgos y gestionar el cambio.....	14
Mensaje clave 8.2	
<b>Se aceleran cambios de especies y pérdida de biodiversidad.....</b>	<b>16</b>
Cambios en la fenología .....	17
Desplazamientos de áreas de distribución.....	18
Sensibilidad de las especies y riesgos de extinción .....	20
Recuadro 8.1. Estudio de caso: Sensibilidad climática de las ballenas francas del Atlántico Norte ....	22
Riesgos de enfermedad .....	23
Riesgos de las especies invasoras .....	24
Ayudar a la adaptación de las especies.....	25
Implicaciones para la gestión.....	27
Mensaje clave 8.3	
<b>Impactos en los servicios ecosistémicos crea riesgos y oportunidades .....</b>	<b>27</b>
Oportunidades para soluciones basadas en la naturaleza.....	30
Recuadro 8.2. Restauración y gestión de ecosistemas por naciones tribales.....	33
<b>Cuentas trazables.....</b>	<b>34</b>
Descripción del proceso .....	34
Mensaje clave 8.1 .....	34
Mensaje clave 8.2.....	36
Mensaje clave 8.3.....	38
<b>Referencias .....</b>	<b>41</b>

## Introducción

El bienestar humano depende de los ecosistemas naturales y gestionados, lo cuales ofrecen funciones y recursos cruciales para casi todo lo que comemos, fabricamos y hacemos.<sup>1</sup> Agua y aire limpios, suelos y nutrientes para la producción de alimentos; madera para la construcción; y otros suministros y servicios de los que dependemos proceden de la naturaleza. Pero muchos ecosistemas se enfrentan cada vez más a riesgos e impactos climáticos que alteran procesos y funciones ecológicas y afectan las especies en todos los niveles de la cadena alimentaria. Estos cambios a su vez pueden provocar una reducción de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos (los beneficios que se reciben de los sistemas naturales; Figura 8.1)<sup>2,3</sup>. Las relaciones entre los seres humanos y los ecosistemas, como los valores de parentesco que muchas comunidades negras, indígenas y tribales experimentan con respecto a la naturaleza, también se ven amenazadas por estos cambios<sup>4,5</sup>.

## Cambio climático en los ecosistemas, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos

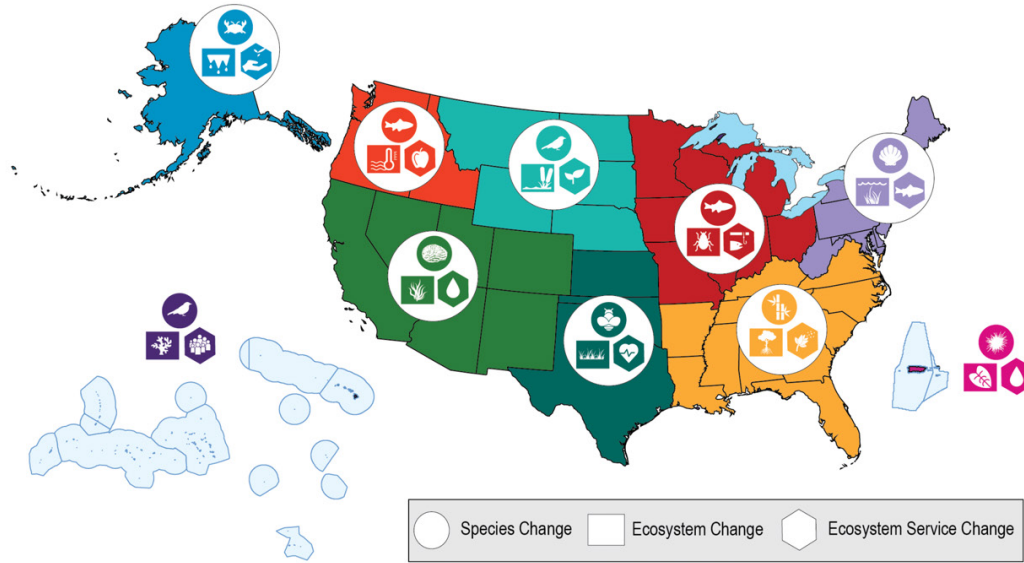


**Los factores de estrés climáticos y no climáticos afectan conjuntamente la biodiversidad, los ecosistemas y los servicios que prestan.**

**Figura 8.1.** Las especies y los ecosistemas responden a las presiones de diferentes maneras, por ejemplo, desplazándose o transformándose en nuevos sistemas, a menudo degradados y menos capaces de proporcionar servicios ecosistémicos<sup>6</sup>. Las medidas de adaptación pueden ayudar a las especies y a los ecosistemas a hacer frente a algunos impactos climáticos, pero no siempre van a ser efectivas o viables, lo que exige tomar decisiones cada vez más difíciles sobre qué recursos priorizar y qué cambios aceptar<sup>7</sup>. Adaptado de Lipton et al. 2018<sup>8</sup>.

Los impactos del cambio climático ya se observan en el deterioro de las funciones de los ecosistemas, así como en los cambios de la productividad primaria marina y terrestre (crecimiento de plantas y algas) y el equilibrio entre la producción primaria y la respiración (es decir, balances de carbono)<sup>2</sup>. La degradación de los ecosistemas aumenta los riesgos para las poblaciones humanas, por ejemplo, en las zonas costeras, donde la pérdida de humedales incrementa los daños provocados por las tormentas (KM 9.2). Otros impactos observados son los desplazamientos de áreas de distribución, ya que las especies se expanden a nuevas regiones o desaparecen de áreas desfavorables, se altera la sincronización de acontecimientos estacionales y del ciclo vital, se aumenta la mortalidad y las extinciones localizadas y se propagan enfermedades y especies invasoras (Figura 8.2)<sup>9,10</sup>. Se proyecta que estos riesgos aumenten con grados adicionales de calentamiento (Figura 8.3)<sup>11,12</sup>, así como con el aumento del dióxido de carbono en la atmósfera, lo que contribuye a la acidificación de los ecosistemas marinos (KM 10.1)<sup>13</sup>.

## Impactos regionales



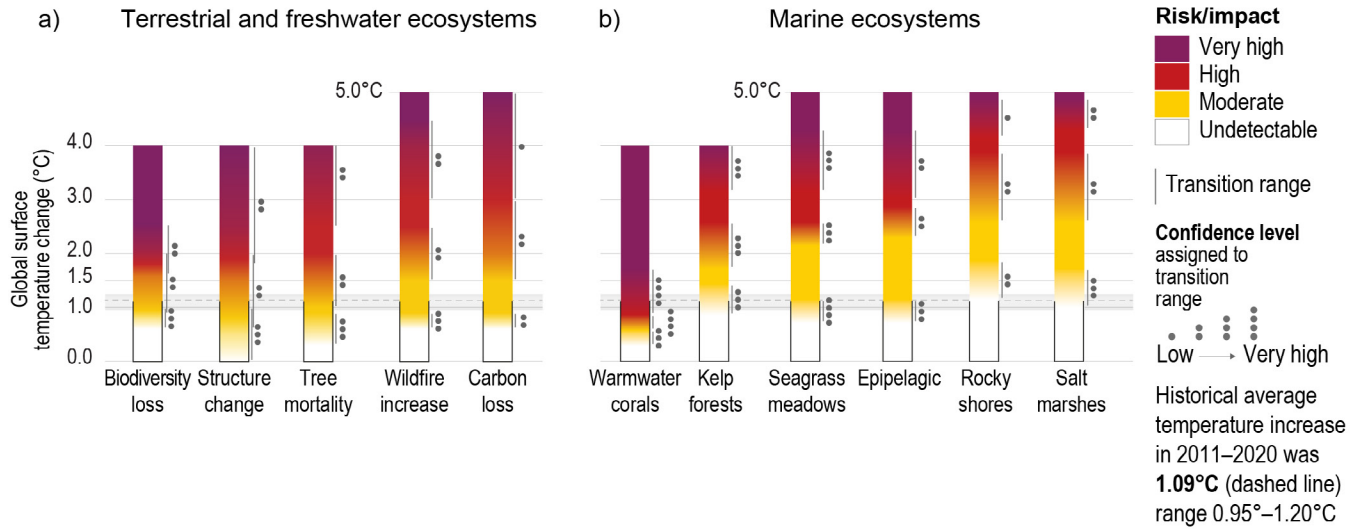
NCA Region	Species Change	Ecosystem Change	Ecosystem Service Change
<b>Alaska</b>	Commercial crab decline (KM 29.5)	Permafrost thaw and erosion (KM 29.5)	Cultural identity loss (Box 29.3)
<b>Northern Great Plains</b>	Grassland bird decline (KM 25.2)	Prairie wetlands threats (Box 25.2)	Delayed harvest of culturally important plants (KM 25.3)
<b>Midwest</b>	Brook trout decline (KM 24.2)	Increased agricultural pests (KM 24.1)	Recreational lake ice loss (Figure 24.6)
<b>Northeast</b>	Sea scallop decline (KM 21.2)	Coastal habitat loss (KM 21.2)	Impacts to fishing communities (KM 21.2)
<b>Southeast</b>	Rivercane loss (Box 22.3)	Coastal forest degradation (KM 22.1)	Increased pollen (KM 22.2)
<b>US Caribbean</b>	Sargassum seaweed increase (KM 23.4)	Tropical forest productivity declines (KM 23.2)	Reduction in water availability (KM 23.3)
<b>Southern Great Plains</b>	Pollinator disruptions (KM 26.2)	Decreased rangeland health (KM 26.1)	Extreme heat affecting human health (KM 26.3)
<b>Southwest</b>	Red abalone critically endangered (KM 28.2)	Kelp forest decline (KM 28.2)	Reduced water availability (KM 28.1)
<b>Hawai'i and US-Affiliated Pacific Islands</b>	Avian extinctions (KM 30.4)	Coral reef loss (KM 30.1)	Cultural practices threats (Box 30.6)
<b>Northwest</b>	Invasive bass increase (KM 27.2)	Marine heatwaves (KM 27.2)	Reduced crop yields (KM 27.3)

**Todas las regiones de EE. UU. están experimentando los impactos del cambio climático sobre las especies, los ecosistemas y los servicios ecosistémicos.**

**Figura 8.2.** Los ejemplos regionales muestran la amplia variedad de posibles impactos en los ecosistemas y sus ramificaciones socioeconómicas. Algunos cambios pueden estar ocurriendo en más de una región (p. ej., la pérdida de arrecifes de coral tanto en Hawaii como en las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. [US-Affiliated Pacific Islands, USAPI] y en el Caribe estadounidense). Créditos de la figura: Rutgers University y USGS.



## Impactos y riesgos para los ecosistemas



### Los impactos y riesgos sobre los ecosistemas aumentan en niveles más altos de calentamiento global.

**Figura 8.3.** A medida que la temperatura global de la superficie aumenta en relación con el período preindustrial (1850-1900), los riesgos para los ecosistemas, como los cambios en su estructura y funcionamiento, se agudizan más allá de los 1.09 °C (1.96 °F) de calentamiento que ya se han producido (línea discontinua gris claro). El riesgo máximo se alcanza por debajo de los 4 °C (7.2 °F) de calentamiento en algunos casos y entre 4 °C y 5 °C (9 °F) en otros. Se prevén riesgos muy elevados para ecosistemas sensibles, como los arrecifes de coral, por encima de los 2 °C (3.6 °F), que serán difíciles de revertir. Adaptado con autorización de la Figura SPM.3 en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) de 2022<sup>2</sup>.

Una gestión basada en los ecosistemas y en el clima que prevea los cambios y se adapte a ellos puede limitar los daños y aumentar la resiliencia de los ecosistemas (Figura 6.7; KM 6.2)<sup>14</sup>. Las estrategias incluyen restauración, protección del hábitat y conectividad; migración asistida; y gestión adaptativa<sup>15,16</sup>. Sin embargo, la gestión adaptativa tiene sus límites, sobre todo, en el caso de sistemas y especies únicos y de los seres humanos que dependen de ellos<sup>2</sup>. Por ejemplo, es posible que la gestión adaptativa no pueda hacer frente al aumento del nivel del mar que sumerge comunidades y ecosistemas costeros (KM 9.1) o a un calor extremo intolerable para los seres humanos u otros organismos (KM 15.1).

Este capítulo se centra en los riesgos para los ecosistemas terrestres, marinos y de agua dulce; se pueden encontrar más detalles sobre los siguientes ecosistemas: Tierra (Capítulo 6), Bosques (Capítulo 7), Costas (Capítulo 9), Océanos (Capítulo 10) y Agroecosistemas (Capítulo 11).

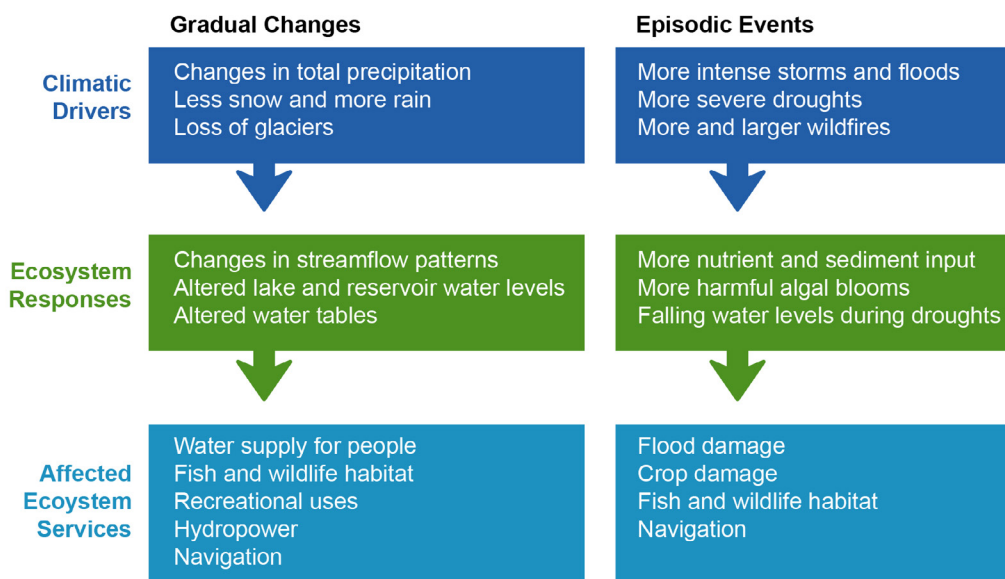
## Mensaje clave 8.1

### El cambio climático está provocando rápidas transformaciones en los ecosistemas

El cambio climático, junto con otros factores de estrés, está provocando cambios transformadores en los ecosistemas, como la pérdida y conversión a otros estados, y cambios en la productividad (*muy probable, confianza alta*). Estos cambios tienen implicaciones importantes para el bienestar humano (*muy probable, confianza alta*). Muchos tipos de eventos extremos están aumentando en frecuencia o severidad y pueden desencadenar cambios bruscos en los ecosistemas (*confianza media*). Los marcos de gobernanza adaptativa, incluida la gestión adaptativa, combinados con seguimiento pueden ayudar a prepararse para, responder a y aliviar los impactos del cambio climático, así como a crear resiliencia para el futuro (*confianza media*).

Los cambios en los ecosistemas pueden deberse a factores físicos (p. ej., estrés térmico), a respuestas biológicas (p. ej., cambios en el desplazamiento) o a ambos, y a menudo interactúan con factores de estrés derivados de las actividades humanas. Múltiples factores de estrés, tanto graduales como episódicos, pueden tener complejos efectos interactivos o amplificadores sobre los ecosistemas (Figura 8.4)<sup>17,18</sup>; por ejemplo, los fuertes huracanes pueden aumentar la vulnerabilidad de los bosques a la sequía o los incendios<sup>19,20</sup>.

#### Amplificación de los efectos del cambio climático en las cuencas hidrográficas

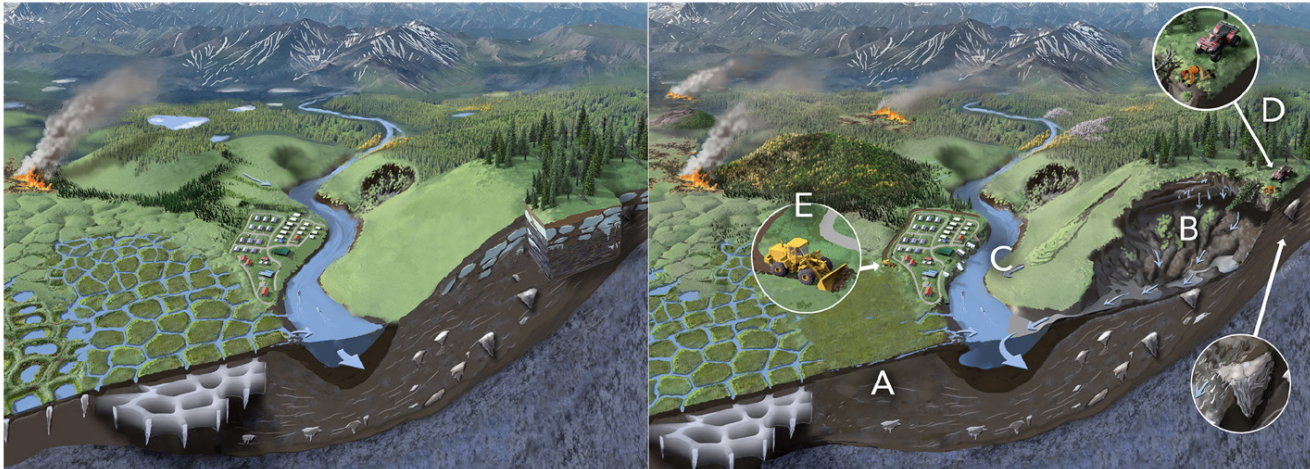


Los efectos del clima en las cuencas hidrográficas ejemplifican los impactos amplificadores de los factores de estrés graduales y episódicos.

**Figura 8.4.** Los factores climáticos, tanto graduales como episódicos (de corta duración), alteran el transporte de agua, nutrientes y sedimentos desde las cuencas hidrográficas terrestres hasta las masas de agua situadas aguas abajo. Estos factores afectan la ecología acuática y los servicios ecosistémicos en todo el sistema hidrológico, incluso en zonas alejadas de los impulsores del cambio (p. ej., precipitaciones más intensas que provocan la lixiviación de fertilizantes que estimulan la proliferación de algas nocivas aguas abajo)<sup>21</sup>. Se proyecta un aumento de la frecuencia e intensidad de los episodios extremos (KM 2.2), lo que incrementará los riesgos para muchas especies (Figura 8.10). Créditos de la figura: : Cary Institute of Ecosystem Studies.

Muchos ecosistemas corren un mayor riesgo de sufrir puntos de inflexión (donde se producen conversiones rápidas e impredecibles a nuevos estados)<sup>22</sup>, aunque es difícil predecir cómo, dónde y cuándo se producirán estos cambios<sup>23,24</sup>. Los cambios transformativos en la composición, la estructura, la función y otras propiedades de los ecosistemas ocasionan un nuevo estado estable, o régimen, con una combinación diferente de especies y comunidades, lo que a menudo se traduce en una reducción de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos<sup>25,26</sup>. Restaurar un ecosistema puede ser difícil o incluso imposible si se cruza un umbral crítico o punto de inflexión y emerge un sistema diferente, ya que cambiar o restaurar los factores que condujeron al estado alterado puede no generar un retorno al estado original (Figura 8.5)<sup>27</sup>.

### Puntos de inflexión y cambios de régimen

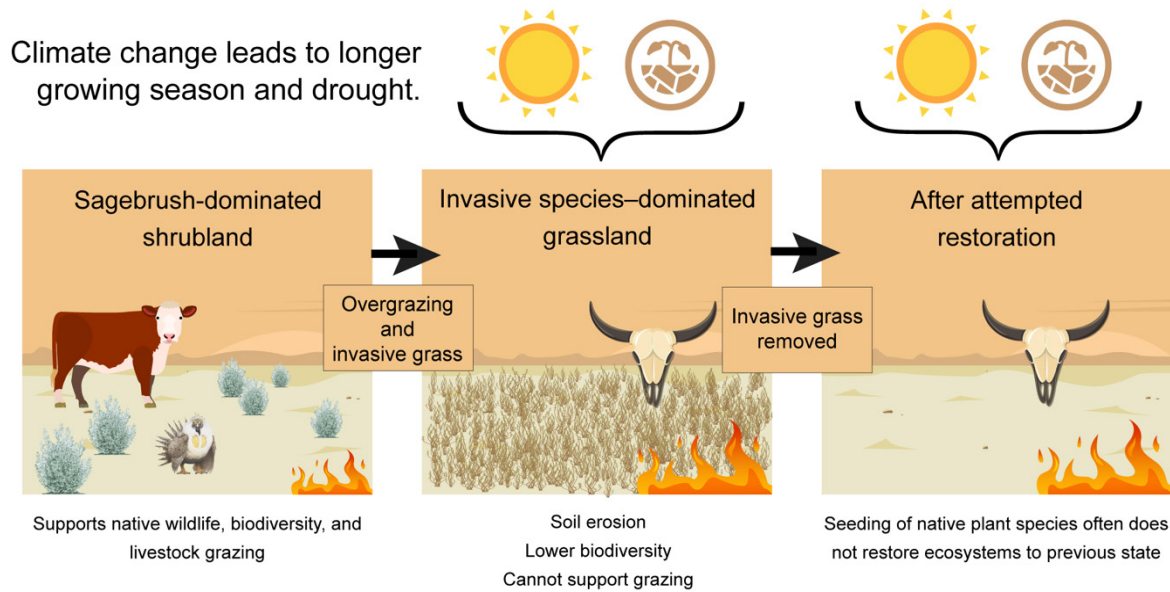


#### El Ártico se enfrenta a impactos sustanciales del deshielo del permafrost que no pueden revertirse.

**Figura 8.5.** El deshielo del permafrost puede provocar puntos de inflexión irreversibles en los paisajes árticos, y transformar ecosistemas intactos (izquierda) en otros severamente alterados (derecha), con impactos para las personas. El calentamiento climático y los incendios provocan el deshielo del suelo. Los bosques árticos y boreales contienen suelos de permafrost con exceso de hielo (más del que contienen los poros del suelo), que forman redes tridimensionales en el suelo. Con el calentamiento, este hielo subterráneo puede derretirse y la superficie del suelo colapsar (A). Los incendios, una parte natural del ciclo de perturbaciones boreales, están aumentando en extensión, frecuencia y severidad. El deshielo puede provocar la acumulación de agua en estanques, lagos y humedales, pero el continuo deshielo puede hacer que los lagos se vacíen. El permafrost también puede descongelarse bruscamente, lo que provoca derrumbes y desprendimientos de bancos (B). Estos cambios geomorfológicos afectan las infraestructuras humanas (C) y el acceso a la tierra (D). Otros riesgos (que no aparecen en la imagen) incluyen la movilización de sustancias químicas y, potencialmente, de enfermedades que pueden amenazar la salud humana y los ecosistemas<sup>28,29</sup>. Las estrategias de adaptación humana al deshielo del permafrost incluyen la instalación de cortafuegos alrededor de las infraestructuras (E). Adaptado de Schuur et al. 2022<sup>30</sup> [CC BY 4.0].

Los cambios en los ecosistemas pueden ser graduales o relativamente bruscos<sup>31</sup>, y dependen en parte de las características del ecosistema y de las especies clave<sup>32</sup>. Los ecosistemas con especies inmóviles o longevas, como los corales o los árboles, pueden presentar a menudo respuestas bruscas porque tienen una capacidad limitada para mantener el ritmo<sup>33,34,35</sup>. Los ecosistemas con mayor biodiversidad tienen más interacciones entre especies y suelen mostrar cambios lentos al principio, seguidos de cambios bruscos<sup>15</sup>. Múltiples factores de estrés pueden provocar efectos sinérgicos y desencadenar cambios bruscos<sup>36</sup>. Algunos ejemplos son el calor extremo, la sequía y las gramíneas invasoras (Figura 8.6)<sup>22</sup> o los incendios forestales seguidos de infestaciones de insectos (o viceversa; enfoque en los incendios forestales del occidente).

## Cambios bruscos en el estado de los ecosistemas

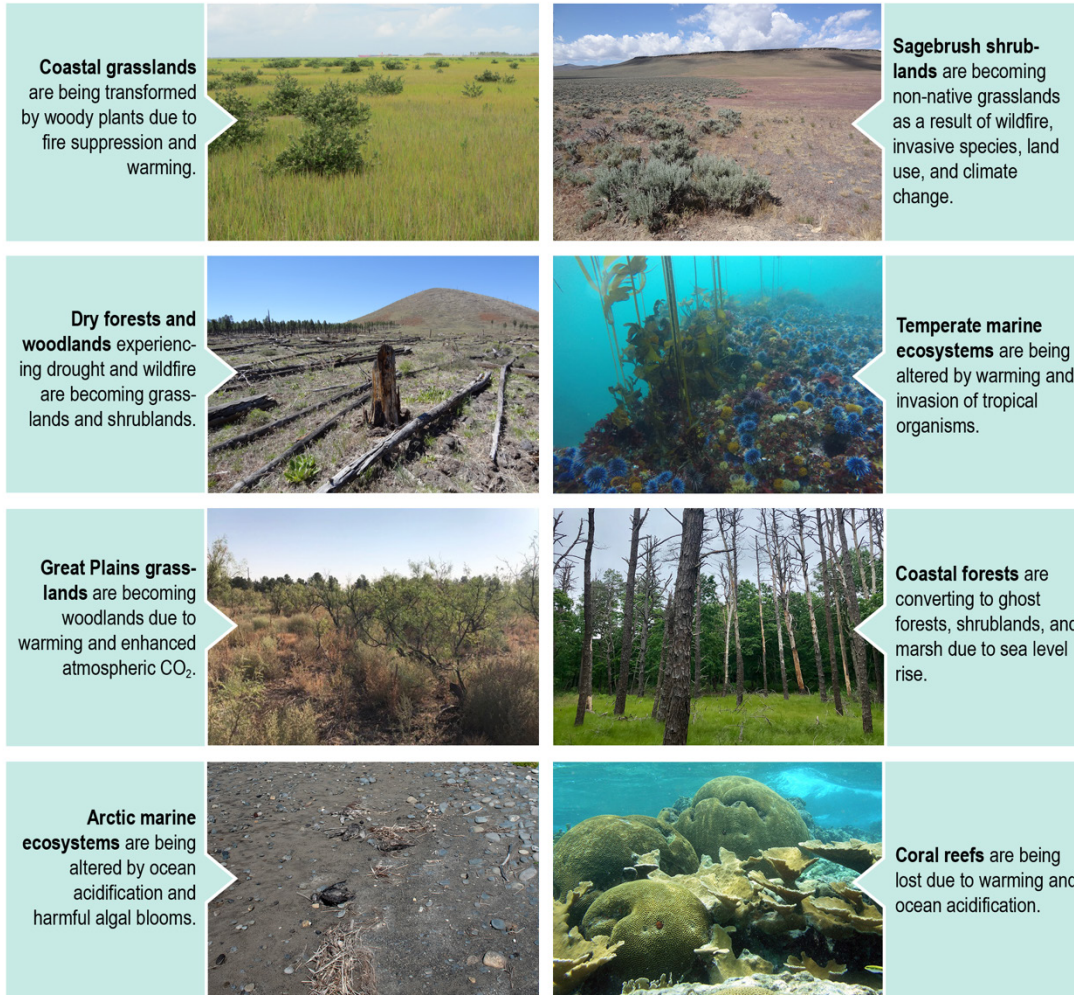


**El cambio climático interactúa con otros factores de estrés para causar efectos sinérgicos, y los cambios resultantes en los ecosistemas pueden ser abruptos y difíciles de revertir.**

**Figura 8.6.** En el oeste de los EE. UU., la sequía y las estaciones de crecimiento más largas y calurosas, combinadas con las gramíneas invasoras y el sobrepastoreo, han transformado los matorrales de artemisa más allá de un punto de inflexión en pastizales anuales que sufren incendios forestales más frecuentes y ya no sustentan la biodiversidad nativa ni el pastoreo de ganado. La eliminación de las gramíneas invasoras y la siembra con plantas nativas no suele restaurar el ecosistema original de matorrales<sup>37</sup>. Adaptado de Foley *et al.* 2015<sup>38</sup> [CC BY 4.0].

La vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio climático depende de la exposición a los factores físicos del cambio y de las características que afectan la sensibilidad de las especies y su capacidad de adaptación<sup>39</sup>. Cada vez son más frecuentes los ejemplos de ecosistemas vulnerables que experimentan transformaciones (Figura 8.7). Hay evidencia de que los ecosistemas con mayor biodiversidad son más resilientes frente al cambio climático<sup>40,41</sup>, lo que indica que una mejor protección y una menor fragmentación y degradación de los ecosistemas son posibles estrategias de adaptación al clima<sup>42</sup>.

## Ecosistemas únicos y vulnerables



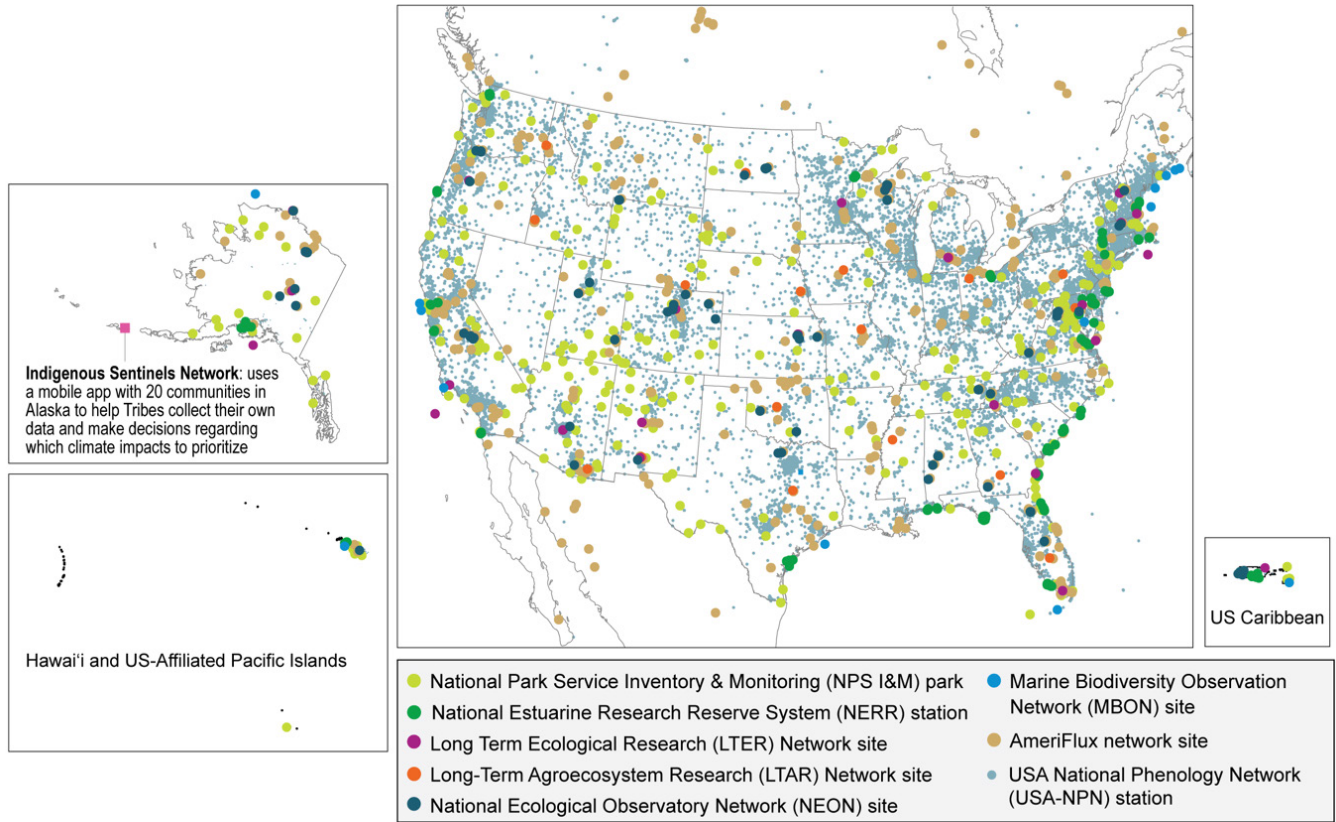
### Las transformaciones de los ecosistemas ya son perceptibles y generalizadas.

**Figura 8.7.** Existen numerosos y muy extendidos ejemplos de ecosistemas que se transforman hacia estados alterados, con impulsores y resultados complejos<sup>22,43,44,45,46</sup>. Las transformaciones ecológicas provocadas por el clima se están produciendo en todas las regiones de los EE. UU. y a menudo afectan negativamente los servicios que prestan estos ecosistemas, como la regulación de los ciclos del carbono y del agua, el hábitat de la vida silvestre y la recreación. Créditos de la figura: USDA Forest Service, USGS y NOAA Fisheries. Créditos de las fotografías (en el sentido de las agujas del reloj desde arriba a la derecha): John Bradford, USGS; Steve Lonhart/NOAA; ©Elizabeth-Ann Jamison; Ilsa B. Kuffner, USGS; Sarah K. Schoen, USGS; ©Nicholas Smith; John Bradford, USGS; ©Anna Armitage.

### Seguimiento de las transformaciones

La identificación y el seguimiento de los rasgos de las especies o los ecosistemas que brindan alertas tempranas de vulnerabilidad, declive de todo el sistema o puntos de inflexión pueden ayudar a reducir los riesgos<sup>26,47,48,49</sup>. En las décadas recientes se han creado numerosas redes de seguimiento a largo plazo (Figura 8.8) en respuesta directa a los cambios climáticos y de otro tipo.<sup>27,50</sup> Actividades científicas dirigidas por la comunidad (“ciudadanas”), como iNaturalist<sup>51</sup> y la Red Nacional de Fenología de Estados Unidos.<sup>52</sup>, junto con redes de seguimiento comunitarias<sup>53</sup> y poseedores de conocimientos indígenas (KM 16.3)<sup>54</sup>, también recopilan observaciones en zonas extensas<sup>55</sup> y han ayudado a detectar alteraciones en la distribución, la abundancia y la fenología de las especies<sup>56,57,58</sup>.

## Seguimiento de los cambios en los ecosistemas



**Los programas de seguimiento son de vital importancia para observar y proyectar las tendencias de resiliencia, invasiones de especies, desplazamientos de áreas de distribución, declives y extinciones.**

**Figura 8.8.** Las redes federales (Inventario y Seguimiento del Servicio de Parques Nacionales [National Park Service Inventory & Monitoring, NPS I&M] y Reserva Nacional de Investigación Estuarina [National Estuarine Research Reserve, NERR]) y otras redes enfocadas en el largo plazo (Investigación Ecológica a Largo Plazo [Long Term Ecological Research, LTER], Investigación a Largo Plazo sobre Agroecosistemas [Long-Term Agroecosystem Research, LTAR], Red Nacional de Observatorios Ecológicos [National Ecological Observatory Network, NEON], Red de Observación de la Biodiversidad Marina [Marine Biodiversity Observation Network, MBON] y AmeriFlux) brindan observaciones consistentes y permanentes en lugares limitados, mientras que las redes de voluntarios (Red Fenológica Nacional de Estados Unidos [USA National Phenology Network, USA-NPN] y Centinelas Indígenas) ofrecen observaciones más oportunistas en un paisaje más amplio. En conjunto, estas redes suministran datos fundamentales para comprender los cambios de las especies y los ecosistemas, aunque sigue habiendo brechas en la cobertura. Créditos de la figura: Lynker y USGS.

## Afrontar los riesgos y gestionar el cambio

El cambio climático y otras perturbaciones que transforman los ecosistemas plantean retos de gestión cada vez mayores<sup>14,59</sup>. Construir, preservar o restaurar los ecosistemas suele ser la estrategia de resiliencia más práctica y efectiva<sup>60,61</sup>; sin embargo, la transformación de los ecosistemas puede seguir siendo inevitable<sup>62</sup>. Los enfoques convencionales de gestión de recursos suelen ser inadecuados para manejar las incertidumbres y las concesiones mutuas relacionadas<sup>63,64</sup>. En cambio, la gestión adaptativa planifica, implementa y modifica de forma iterativa las estrategias de manejo de los recursos en condiciones de incertidumbre. El éxito de la gestión adaptativa requiere un enfoque global de gobernanza adaptativa que suministre estructuras institucionales y procesos de toma de decisiones para coordinar los esfuerzos a distintas escalas<sup>65</sup>, maneje las incertidumbres y conflictos<sup>66,67</sup>, movilice conocimientos diversos y aborde los intereses de las partes interesadas<sup>68,69,70</sup>.

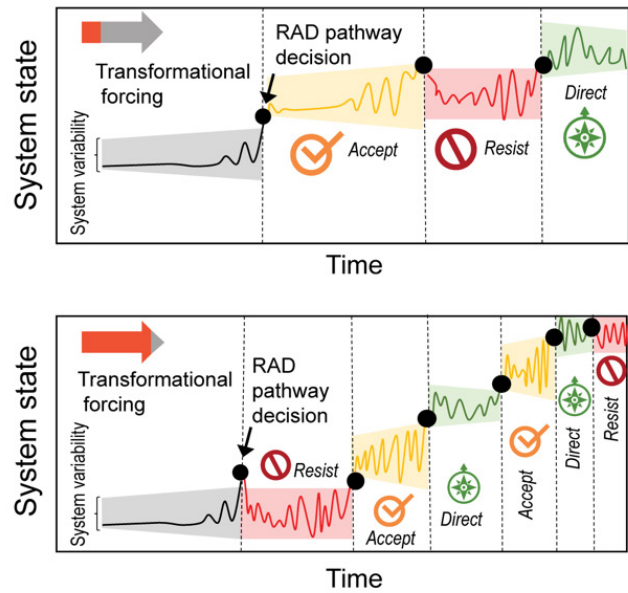
Los marcos de decisión diseñados para anticipar la transformación de los ecosistemas pueden hacer avanzar los procesos de gestión adaptativa (Figura 8.9)<sup>71</sup>. Por ejemplo, el marco resistir-aceptar-dirigir (Resist-Accept-Direct, RAD) ayuda a identificar las condiciones en las que la gestión de los ecosistemas puede resistirse a una trayectoria de cambio, aceptar el cambio o dirigirlo hacia las condiciones futuras deseadas (Figura 8.9b)<sup>62,72</sup>. Para involucrar lo “directo” en su planificación RAD, el Refugio Nacional de Vida Silvestre de Tetlin, en Alaska, está combinando escenarios, gestión adaptativa y planificación adaptativa de trayectorias para involucrar a los gestores y a las partes interesadas en la exploración de posibles transformaciones, centrándose específicamente en la caza de subsistencia<sup>73</sup>.

**Marcos de planificación de la adaptación y la transformación**

a) Corals and Climate Adaptation Planning cycle



b) Resist-Accept-Direct framework



**Los marcos de decisión pueden ayudar a planificar la posible transformación de los ecosistemas.**

**Figura 8.9.** Dos ejemplos de marcos de decisión adaptativos son el ciclo de corales y planificación de la adaptación al clima (a) y el marco resistir-aceptar-dirigir (Resist-Accept-Direct, RAD) (b). En (a), se guía a los usuarios a través de consideraciones de evaluación y diseño para ajustar las intervenciones de gestión climáticamente inteligente. En (b), el ecosistema actual (gris) se ve afectado por un forzamiento transformacional moderado o fuerte que impulsa decisiones (puntos negros) para resistir (períodos rojos), aceptar (períodos amarillos) y dirigir (períodos verdes) la trayectoria del cambio. (a) Adaptado de West et al. 2017, 2018<sup>74,75</sup> [CC BY 4.0]; (b) adaptado de Lynch et al. 2022<sup>72</sup>.

## Mensaje clave 8.2

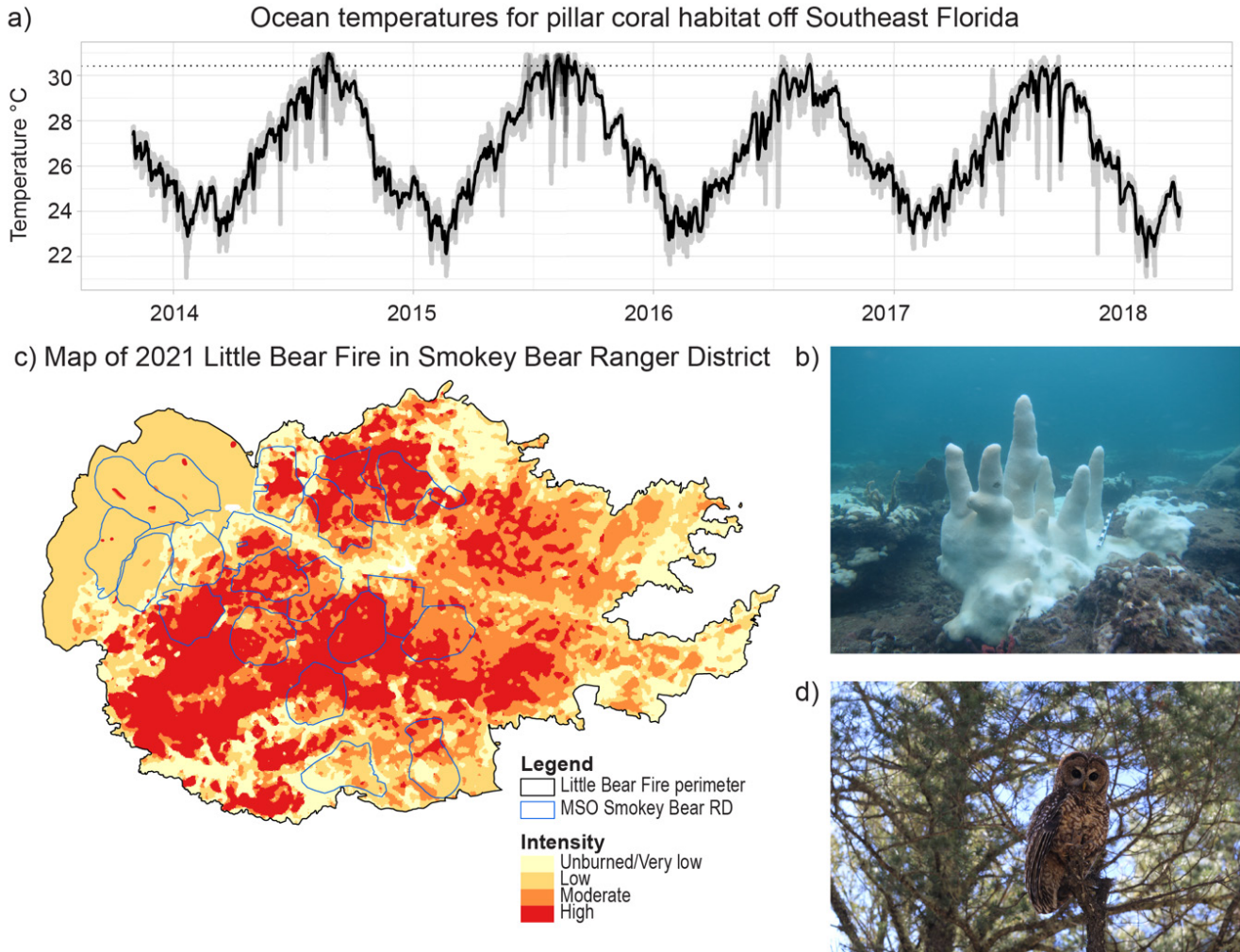
### Se aceleran cambios de especies y pérdida de biodiversidad

La interacción del cambio climático con otros factores de estrés está provocando la pérdida de biodiversidad, cambios en la distribución de las especies y en sus ciclos vitales y un aumento del impacto de las especies invasoras y las enfermedades, lo cual tiene consecuencias económicas y sociales (*muy probable, confianza alta*). Las respuestas futuras de las especies y las poblaciones dependerán de la magnitud y la sincronización de los cambios, junto con la sensibilidad diferencial de los organismos; las especies que no pueden reubicarse fácilmente o que son muy sensibles a la temperatura pueden enfrentarse a mayores riesgos de extinción (*muy probable, confianza alta*). La identificación de riesgos (p. ej., eventos extremos) ayudará a priorizar las especies y los lugares que deben protegerse y a mejorar las opciones de gestión (*muy probable, confianza alta*).

Los factores de estrés relacionados con el clima y otros impulsores del cambio global, como el cambio en el uso de la tierra, la destrucción de hábitats y la cosecha excesiva, pueden provocar cambios y pérdidas significativas de biodiversidad (Figura 8.1)<sup>76,77</sup>. Incluso eventos extremos de corto plazo, como las olas de calor<sup>78,79,80</sup>, pueden generar impactos significativos sobre las especies. Por ejemplo, los arrecifes de coral están amenazados por los impactos acumulativos del calentamiento y la acidificación de los océanos, las olas de calor marinas que provocan blanqueamiento y una mayor susceptibilidad a las enfermedades, los ciclones tropicales cada vez más potentes que causan pérdida de complejidad estructural, los episodios de hipoxia (bajo nivel de oxígeno), la sobrepesca y la contaminación (Figura 8.10a, b; Recuadro 10.1; KM 9.2, 10.1)<sup>81,82,83,84,85,86</sup>. Del mismo modo, los incendios forestales (enfoque en los incendios forestales del occidente)<sup>87</sup> pueden crear riesgos para algunas especies tanto directa (Figura 8.10c, d) como indirectamente a través de cambios en el hábitat de más largo plazo<sup>88</sup>.



## Impactos de los eventos extremos



**Los eventos extremos a corto plazo pueden tener impactos severos en las especies amenazadas.**

**Figura 8.10.** Dos ejemplos de estos impactos son los siguientes. (a) Las altas temperaturas del agua frente al sureste de Florida superaron la temperatura promedio mensual máxima (línea horizontal en la serie temporal) en 2014-2015, lo que provocó un blanqueamiento severo de las (b) colonias de coral pilar (*Dendrogyra cylindrus*) y la posterior enfermedad y muerte de todos los ejemplares. (c) Los incendios forestales afectaron más del 75 % de las parejas reproductoras (polígonos azules) de (d) búho moteado mexicano (Mexican Spotted Owl, MSO; *Strix occidentalis lucida*) en el Distrito de Guardabosques de Smokey Bear, Nuevo México, en 2012. Créditos de la figura: (a) adaptado de Jones et al. 2021<sup>89</sup> [CC BY 4.0]; (c) USDA Forest Service, NOAA Fisheries y NOAA NCEI. Créditos de las fotografías: (b) ©David Gilliam, Nova Southeastern University; (d) ©Serra J. Hoagland, USDA Forest Service.

## Cambios en la fenología

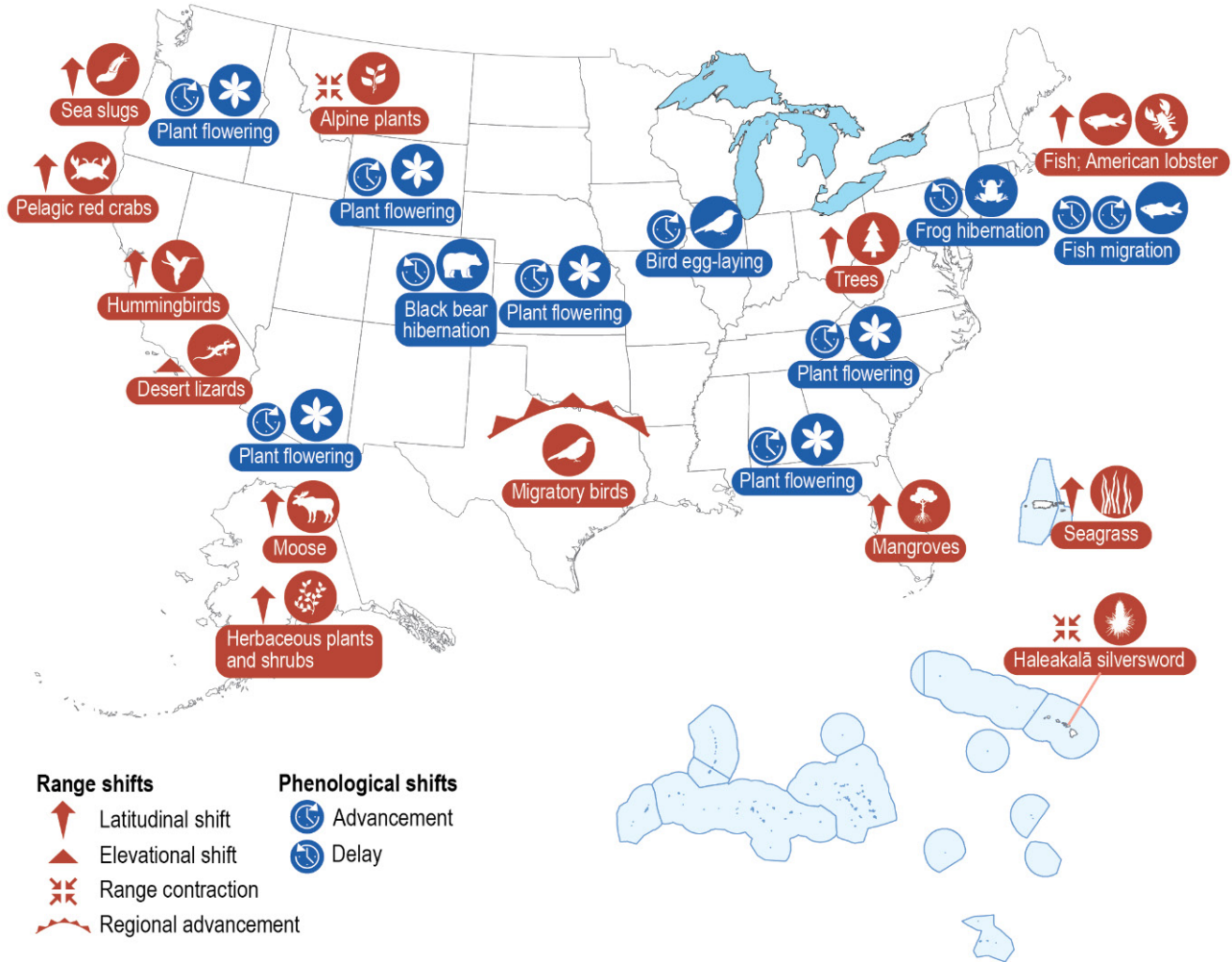
Para agravar las respuestas de las especies a los eventos extremos, la sincronización de eventos estacionales como la salida de las hojas, el florecimiento, la migración, el desove, las floraciones de fitoplancton y la eclosión de huevos está cambiando en respuesta al aumento de las temperaturas invernales y primaverales y a la alteración de la sincronización y la cantidad de deshielo y precipitaciones (Figuras 8.8, A4.13)<sup>58,90,91,92</sup>. Los cambios incluyen un florecimiento y madurez más tempranas en los cultivos agrícolas que afectan los tiempos de siembra y cosecha<sup>93,94,95,96,97</sup>, estaciones alérgicas más largas e intensas (KM 14.4)<sup>98</sup> y una mayor actividad de las plagas<sup>99,100</sup>. Los cambios son más pronunciados en latitudes y elevaciones altas y en zonas

urbanizadas<sup>101,102</sup>. Los desajustes fenológicos surgen cuando la sincronización de actividades de las especies que interactúan cambia a ritmos diferentes, como cuando la disponibilidad de alimentos deja de coincidir con las necesidades de un organismo dependiente<sup>103,104</sup>. Los cambios fenológicos también afectan al ciclo estacional del carbono<sup>105</sup> y aumentan la vulnerabilidad a las heladas primaverales (Apéndice 4)<sup>106</sup>. Estos cambios tienen importantes impactos económicos y sociales, como el impacto turístico y la pérdida de especies de importancia cultural<sup>107,108</sup>.

### ***Desplazamientos de áreas de distribución***

El cambio climático ya ha provocado desplazamientos de altitud y latitud en el área de distribución de varias especies (Figura 8.11)<sup>109,110,111</sup>, siendo los desplazamientos de las especies marinas más sensibles y de mayor magnitud que los de las terrestres (KM 10.1; Figura A4.12)<sup>112</sup>. Las áreas de distribución montañosas se están reduciendo a medida que las especies se desplazan ladera arriba, siendo las de mayor altitud las más vulnerables<sup>113,114</sup>. Se espera que los inviernos más suaves y los períodos de crecimiento más cálidos amplíen las áreas de distribución de algunas especies<sup>115,116</sup>.

## Desplazamientos de áreas de distribución y cambios en la fenología observados

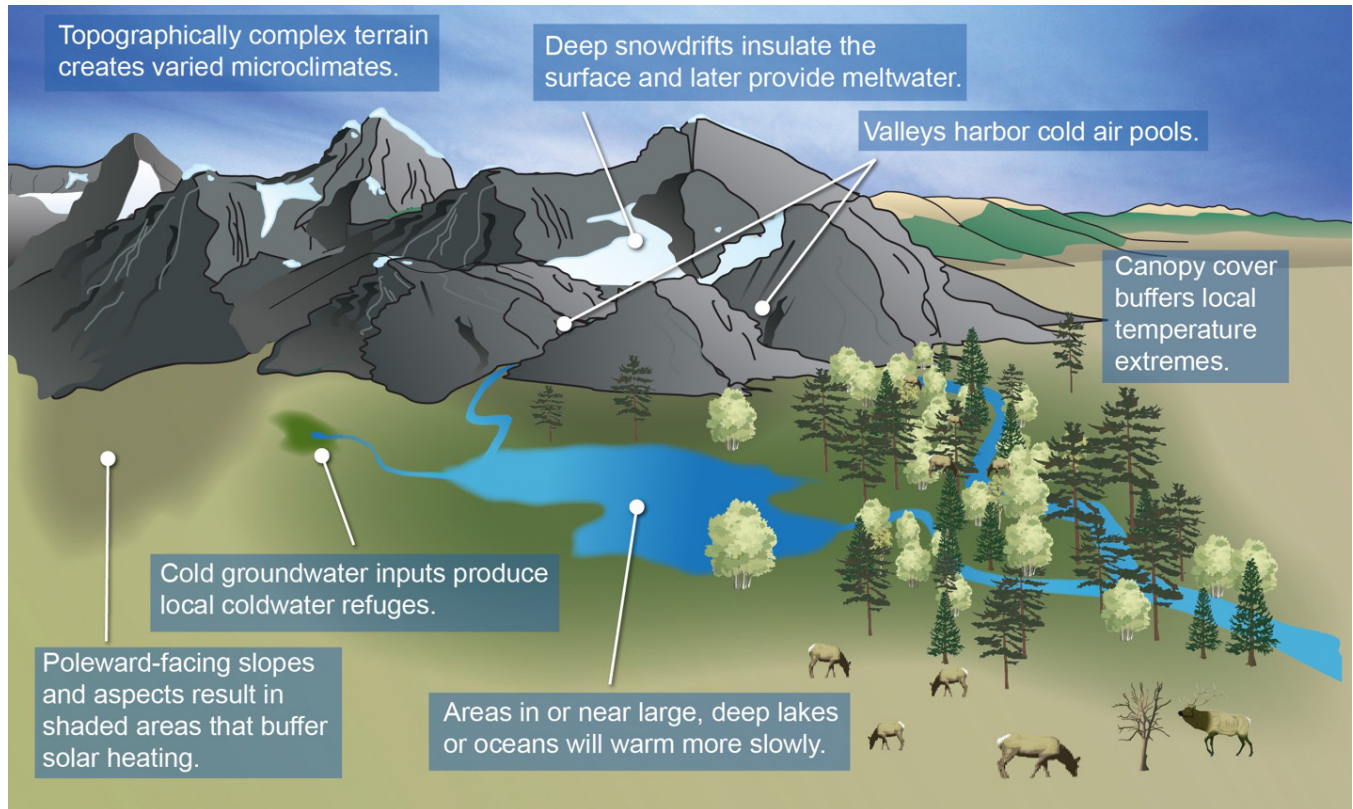


**El cambio climático está provocando cambios en la fenología y el área de distribución de las especies en Estados Unidos.**

**Figura 8.11.** Muchas especies vegetales y animales se están desplazando a zonas más elevadas, a latitudes más al norte o en múltiples direcciones (lo que aquí se denomina “avance regional”). La sincronización de la actividad estacional está cambiando de forma similar en respuesta a las temperaturas más cálidas y a los cambios en los regímenes de precipitaciones, y en muchos casos se produce a principios de año, aunque la dirección y la magnitud de los cambios son específicas de cada especie. Créditos de la figura: University of Arizona y USFWS.

Las condiciones pueden cambiar a escalas muy localizadas, lo que crea complejos patrones de “mosaico” de factores de estrés medioambiental<sup>117,118,119,120</sup>. Los refugios climáticos se dan en lugares donde las condiciones medioambientales cambian más lentamente que en las zonas circundantes<sup>121</sup> o donde los factores locales prevalecen sobre los procesos a escala regional<sup>122</sup>. Se espera que estos refugios sustenten organismos que puedan repoblar otras zonas agotadas mediante la dispersión a través de corrientes o corredores terrestres<sup>123</sup> y son, por lo tanto, una prioridad para la conservación (Figura 8.12)<sup>124,125</sup>. La identificación de los numerosos refugios existentes que se estima que desaparezcan con el cambio climático es crucial<sup>126,127</sup>.

## Mosaicos medioambientales y refugios climáticos



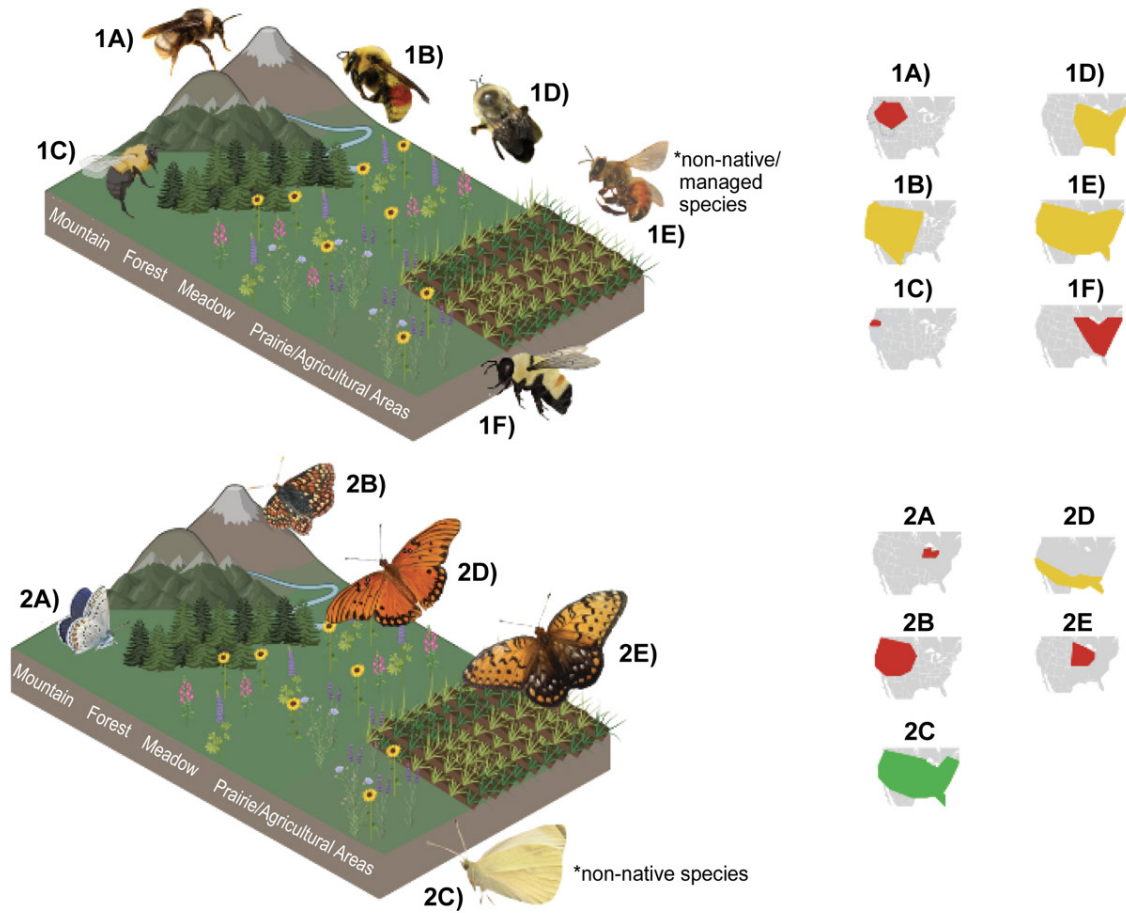
Los refugios climáticos son lugares donde las condiciones medioambientales cambian más lentamente que en la región circundante.

**Figura 8.12.** Los refugios ayudan a las poblaciones a sobrevivir a eventos extremos y, cuando están conectados a través de corrientes y corredores de dispersión, pueden servir como lugares de rescate<sup>122</sup>. Comprender las variaciones en la exposición medioambiental y la sensibilidad de los organismos a condiciones extremas ayuda a pronosticar el impacto del clima<sup>122,127</sup> e informar sobre las estrategias de gestión<sup>128,129</sup>. Adaptado de Morelli et al. 2016<sup>130</sup> [CC0 1.0].

## Sensibilidad de las especies y riesgos de extinción

Comprender la sensibilidad de las especies a los impactos climáticos y su capacidad de adaptación puede ayudar a detectar puntos de inflexión ecológicos (KM 8.1)<sup>131,132</sup>. Animales de gran tamaño (Recuadro 8.1)<sup>133</sup> y las especies que ocupan hábitats polares corren un riesgo especial de extinción local debido a sus vulnerabilidades fisiológicas<sup>134</sup>. Por el contrario, las especies de cuerpo más pequeño suelen tener respuestas más variables a condiciones cambiantes (Figura 8.13).

### Sensibilidades observadas de los polinizadores



	Population decrease/range contraction	1) Bees (Apidae)	2) Butterflies (Lepidoptera)
	Uncertain population/range change	A) Western bumble bee ( <i>Bombus occidentalis</i> )	A) Karner blue ( <i>Lycaeides melissa samuelis</i> )
	Population increase/range expansion	B) Hunt's bumble bee ( <i>Bombus huntii</i> )	B) Edith's checkerspot ( <i>Euphydryas editha</i> )
		C) Franklin's bumble bee ( <i>Bombus franklini</i> )	C) Cabbage white ( <i>Pieris rapae</i> )
		D) Common eastern bumble bee ( <i>Bombus impatiens</i> )	D) Gulf fritillary ( <i>Agraulis vanillae</i> )
		E) Western honey bee ( <i>Apis mellifera</i> )	E) Regal fritillary ( <i>Speyeria idalia</i> )
		F) Rusty patched bumble bee ( <i>Bombus affinis</i> )	

Las respuestas de los insectos polinizadores a los factores de estrés medioambiental, incluso dentro del mismo grupo taxonómico, pueden variar mucho.

**Figura 8.13.** Las respuestas de los polinizadores a las cambiantes condiciones climáticas en un corto tiempo (entre 10 y 30 años pasados) están ocasionando complejos patrones de movimientos de especies a través del paisaje. Varias especies de abejorros (**panel 1**) han tenido diferentes respuestas en los últimos 10 años, desde cambios de hábitat dentro de sus áreas de distribución hasta contracciones y riesgos de extinción. En el **panel 2** las especies de mariposas están respondiendo con disminuciones y desplazamientos dentro de las áreas de distribución existentes o con ampliaciones de las áreas de distribución en todo el país. Créditos de la figura: Colorado State University.

## Recuadro 8.1. Estudio de caso: Sensibilidad climática de las ballenas francas del Atlántico Norte

La ballena franca del Atlántico Norte (*Eubalaena glacialis*) es una de las grandes ballenas más amenazadas del mundo, debido principalmente a la caza comercial histórica, de la que quedan menos de 350 ejemplares<sup>135</sup>. Esta especie es vulnerable a la extinción provocada por el cambio climático, en parte debido a su gran tamaño, larga esperanza de vida, crecimiento lento, madurez tardía y escaso número de crías<sup>136</sup>. La recuperación de la población se ha visto dificultada por los cambios provocados por el clima en la distribución, la disponibilidad y la calidad del zooplancton, que ha alterado los patrones de alimentación de las ballenas (KM 10.1)<sup>133,137,138</sup>. A medida que la búsqueda de refugio y alimento se hace más difícil, las ballenas se vuelven más susceptibles a las enfermedades, los enredos en equipo de pesca y las colisiones con embarcaciones, lo que contribuye a la disminución del tamaño corporal y el éxito reproductivo (Figura 8.14)<sup>139,140</sup>. La pérdida de estas ballenas puede tener efectos en cascada sobre la composición y función del ecosistema<sup>141</sup>.

### Amenazas para las ballenas francas del Atlántico Norte



**El cambio climático aumenta los riesgos para la ballena franca del Atlántico Norte, especie amenazada.**

**Figura 8.14.** La ballena conocida como Snow Cone aparece con su cría recién nacida cerca de Cumberland Island, Georgia, en 2021. Estuvo enredada en una cuerda de pescar durante al menos dos años y actualmente se presume que ha fallecido. Estas amenazas se agravan cuando las ballenas se desplazan a nuevas zonas de alimentación debido a las cambiantes condiciones oceanográficas. Créditos de la fotografía: © Georgia Department of Natural Resources /Permiso de la NOAA n.º 20556.

## Riesgos de enfermedad

Las amenazas de enfermedades para la vida silvestre, las plantas y los seres humanos han surgido como un riesgo significativo del cambio climático<sup>142,143,144,145,146,147</sup>. El cambio climático favorece la expansión del área de distribución y el crecimiento de la población de las especies que propagan enfermedades (vectores), el aumento de la susceptibilidad de los huéspedes a través del estrés y la mejora de la transmisión de patógenos (Tabla 8.1; KM 15.1)<sup>148</sup>, con importantes consecuencias económicas<sup>149,150</sup>. Se proyecta que la prevalencia aumente aún más a medida que las poblaciones y los ecosistemas se vean sometidos a estrés por la variación de las temperaturas y los eventos extremos, los cambios en los hábitats, la alteración de los patrones migratorios y las áreas de distribución, la pérdida de biodiversidad y el aumento de las especies invasoras (KM 15.1, 30.4; Figura A4.16)<sup>151,152,153,154</sup>.

**Tabla 8.1. Impacto del clima en el riesgo de enfermedades en seres humanos y en la vida silvestre**

LEYENDA: Numerosas enfermedades en seres humanos y en la vida silvestre (KM 15.1) se están extendiendo a nuevas zonas y especies y se están haciendo más comunes a medida que el cambio climático amplía las áreas de distribución de los vectores y modifica las interacciones entre especies y las preferencias de hábitat. Fuentes: Islam *et al.* 2022; Gilbert 2021; Ogden *et al.* 2021; Sonenshine 2018; Keesing y Ostfeld 2021<sup>152,153,155,156,157</sup>.

### Patógeno: virus

Enfermedad	Organismos afectados
Virus del Nilo Occidental	Aves y mamíferos
Virus de la septicemia hemorrágica vírica	Peces de agua dulce y marina
Virus del síndrome de las manchas blancas	Crustáceos acuáticos
Virus del bronceado del tomate	Plantas

**Ejemplo de impactos:** La **septicemia hemorrágica vírica** daña a los peces salvajes y de piscifactoría, como la trucha arco iris, y los patrones de propagación y establecimiento están muy correlacionados con las variables climáticas (temperatura, precipitaciones)<sup>158</sup>.

### Patógeno: bacterias

Enfermedad	Organismos afectados
Furunculosis	Trucha y salmón
Enfermedad entérica de la boca roja	Peces de agua dulce y marina
Enfermedad del Dragón amarillo	Plantas

**Ejemplo de impactos:** La **enfermedad del Dragón amarillo** es una enfermedad bacteriana transmitida por un insecto invasor (el psílido asiático de los cítricos). Dado que la enfermedad es muy sensible a la temperatura, se espera que el cambio climático permita que se extienda aún más<sup>159</sup>. Desde 2005, la producción de cítricos de Florida ha disminuido un 74 %<sup>160</sup>.

### Patógeno: hongos

Enfermedad	Organismos afectados
Síndrome de la nariz blanca	Murciélagos
Quitridiomycosis	Anfibios
Muerte rápida de 'Ōhi'a	Plantas
Podredumbre radicular por armillaria	Plantas

**Ejemplo de impactos:** La **muerte rápida de la 'Ōhi'a** es una enfermedad fúngica que afecta a la *'Ōhi'a lehua*, una especie hawaiana clave con importantes papeles funcionales y culturales. Se proyecta que la mortalidad a gran escala empeore en un clima más cálido y húmedo<sup>161</sup>.

### Patógeno: parásito

Enfermedad	Organismos afectados
Paludismo aviar	Aves
Enfermedad renal proliferativa	Salmón
Gusano del cerebro	Alce, ciervo, caribú
Enfermedad de los pastos marinos	Plantas acuáticas

**Ejemplo de impactos:** El **gusano del cerebro** es un nematodo parásito que se propaga a través de los ciervos de cola blanca, que actualmente se están expandiendo hacia el norte. En el caso de los alces, los descensos de población debido al gusano del cerebro ya están afectando la caza de subsistencia entre algunas comunidades tribales<sup>162</sup>.

### Patógeno: desconocido

Enfermedad	Organismos afectados
Enfermedad de pérdida de tejido del coral pétreo	Corales
Enfermedad de la banda blanca	Corales
Trastorno de colapso de colonias	Abejas

**Ejemplo de impactos:** La **enfermedad de pérdida de tejido del coral pétreo** se originó en Florida en 2014 y se ha extendido por todo el Caribe, con el estrés térmico implicado en la vulnerabilidad de los arrecifes. La enfermedad afecta más de 30 especies de coral, entre ellas muchas importantes constructoras de arrecifes. La rápida propagación y las elevadas tasas de mortalidad han tenido importantes consecuencias económicas para el turismo y la pesca<sup>163</sup>.

### Riesgos de las especies invasoras

El cambio climático ha creado incertidumbre sobre dónde y con qué rapidez se propagarán las especies invasoras, pero se han observado casos<sup>164</sup> y proyecciones que muestran aumentos esperados<sup>165</sup>. Por ejemplo, especies invasoras sensibles al frío como la vid kudzu (*Pueraria montana* variedad *lobata*) pueden extenderse hacia el norte con el calentamiento<sup>166</sup>. Algunas especies invasoras tienen más éxito que las nativas —sobre todo algunas plantas terrestres<sup>167</sup> y especies acuáticas<sup>168</sup>—, ya que toleran mejor las condiciones cambiantes o se adaptan más rápidamente a ellas (Figura 8.15). Sin embargo, no todas las especies invasoras se ven favorecidas por el cambio climático; muchas plantas y vertebrados invasores pueden ver reducidas sus áreas de distribución, mientras que se espera que aumenten las de muchos invertebrados y patógenos invasores<sup>169</sup>.



## Especies invasoras y cambio climático



### Especies invasoras dañinas que se espera que cambien de área de distribución debido al cambio climático.

**Figura 8.15.** Algunos ejemplos de especies invasoras son los siguientes: (a) se prevé que el ácaro de la cicuta, una plaga de insectos, se extienda hacia el norte con inviernos más cálidos y provoque la muerte de los árboles de cicuta oriental<sup>170</sup>; (b) se espera que las carpas invasoras se beneficien de las aguas más cálidas y se expandan por los Grandes Lagos, donde competirán con los peces nativos y supondrán un peligro para la navegación por su costumbre de saltar fuera del agua<sup>171</sup>; (c) el milenrama de agua euroasiático asfixia los sistemas de agua dulce y supera las especies nativas en condiciones más cálidas<sup>172</sup> (d); los cangrejos verdes europeos, que se benefician de las aguas más cálidas, perjudican la pesca comercial de mariscos nativos de importancia económica<sup>173</sup>. Créditos de las fotografías: (a) Kerry Wixted a través de Flickr [CC BY-NC 2.0]; (b) Steve Hillebrand, USFWS; (c) ©Stephen K. Hamilton, Cary Institute of Ecosystem Studies; (d) ©P. Sean McDonald, University of Washington.

### Ayudar a la adaptación de las especies

Los gerentes de los recursos naturales están implementando medidas de adaptación que incluyen aumento de los esfuerzos de conservación, reducción de la fragmentación de los hábitats, protección de los corredores de vida silvestre, ayuda a la migración de las especies y ampliación de las actividades de protección<sup>174</sup>. Por ejemplo, las zonas marinas protegidas pueden reducir los factores de estrés no climáticos, como la sobrepesca, y facilitar la recuperación de las poblaciones después de eventos extremos como las olas de calor, lo que beneficia la pesca recreativa y comercial en las zonas circundantes (KM 28.2)<sup>175</sup>. Muchos estados incluyen ahora los impactos climáticos en los planes de acción estatales para la vida silvestre; por

ejemplo, Massachusetts ha identificado parches de hábitat que permiten el movimiento de la amenazada tortuga Blandingi y está creando hábitats que equilibran el aumento de la sequía y otras amenazas<sup>176,177,178</sup>.

La gestión de la conectividad puede mejorar la resiliencia climática de las especies, sobre todo las migratorias y las de gran distribución<sup>179</sup>. Las prioridades incluyen la conexión de refugios climáticos y zonas de gran diversidad<sup>123,180</sup> y los tipos de hábitat actuales y futuros.<sup>181</sup> Por ejemplo, las estrategias de resiliencia para el chingolo colifino (*Ammospiza caudacuta*), que ha disminuido drásticamente debido al aumento del nivel del mar, incluyen protección de áreas que se espera que se conviertan en futuros humedales, uso de canales y otras manipulaciones de elevación y restauración de pantanos altos<sup>182,183</sup>.

Se ha implementado la migración asistida para especies en riesgo como el albatros de Laysan, el caracol de árbol de Oahu, la rana leopardo relictas y el lobo (Figura 8.16)<sup>184</sup>. En el Bosque Nacional Chippewa de Minnesota se están plantando semillas de especies arbóreas nativas de los bosques de pino rojo pero recolectadas a 100-200 km al sur —y, por lo tanto, genéticamente distintas de las poblaciones locales— para probar la migración asistida<sup>185</sup>.

### Gestión para la adaptación de las especies



**La migración asistida puede ayudar a las especies a adaptarse a las cambiantes condiciones climáticas.**

**Figura 8.16.** Un ejemplo es la translocación de lobos al Parque Nacional de Isle Royale (Michigan). La pérdida de puentes de hielo en invierno impidió nuevas llegadas que habrían mantenido la viabilidad genética de la población<sup>186</sup>. Créditos de la fotografía: Jacob W. Frank, NPS.

## Implicaciones para la gestión

Aunque las áreas protegidas pueden ayudar a las especies a adaptarse al cambio climático, estas son en sí mismas vulnerables<sup>174,187,188,189</sup>; se espera que muchas áreas protegidas de los EE. UU. sufran cambios importantes en sus comunidades de vegetación y otras especies<sup>190</sup>. Además, el actual sistema de áreas protegidas de los EE. UU. se solapa poco con los refugios climáticos proyectados<sup>191</sup>; la ampliación de la protección para incluir la idoneidad futura del hábitat de algunas especies puede duplicar los costos<sup>192</sup>. Dados los continuos cambios en las áreas de distribución, las áreas con especies prioritarias que atraen turistas (p. ej., observadores de aves) tendrán que reorientarse a medida que algunas especies se vuelvan más raras o desaparezcan<sup>193,194</sup>, lo que impacta las comunidades vecinas que dependen de los ingresos del turismo.

Se están produciendo conflictos (entre humanos y con la vida silvestre) derivados de los cambios en la distribución y disponibilidad de especies y recursos provocados por el clima<sup>195,196</sup>. Por ejemplo, algunas especies se están desplazando fuera de las áreas establecidas para su conservación, y los cambios en el área de distribución de las poblaciones de peces (incluso a través de fronteras internacionales) están causando problemas (KM 10.1)<sup>197,198</sup>. Algunas políticas de adaptación (p. ej., la translocación de especies no humanas a comunidades humanas que no están dispuestas a coexistir con ellas) pueden exacerbar los conflictos (KM 17.2)<sup>199</sup>. Una gestión adaptativa que dé prioridad tanto a la planificación de la respuesta al cambio climático como a la gestión de conflictos puede reducir los resultados negativos<sup>195,200,201</sup>.

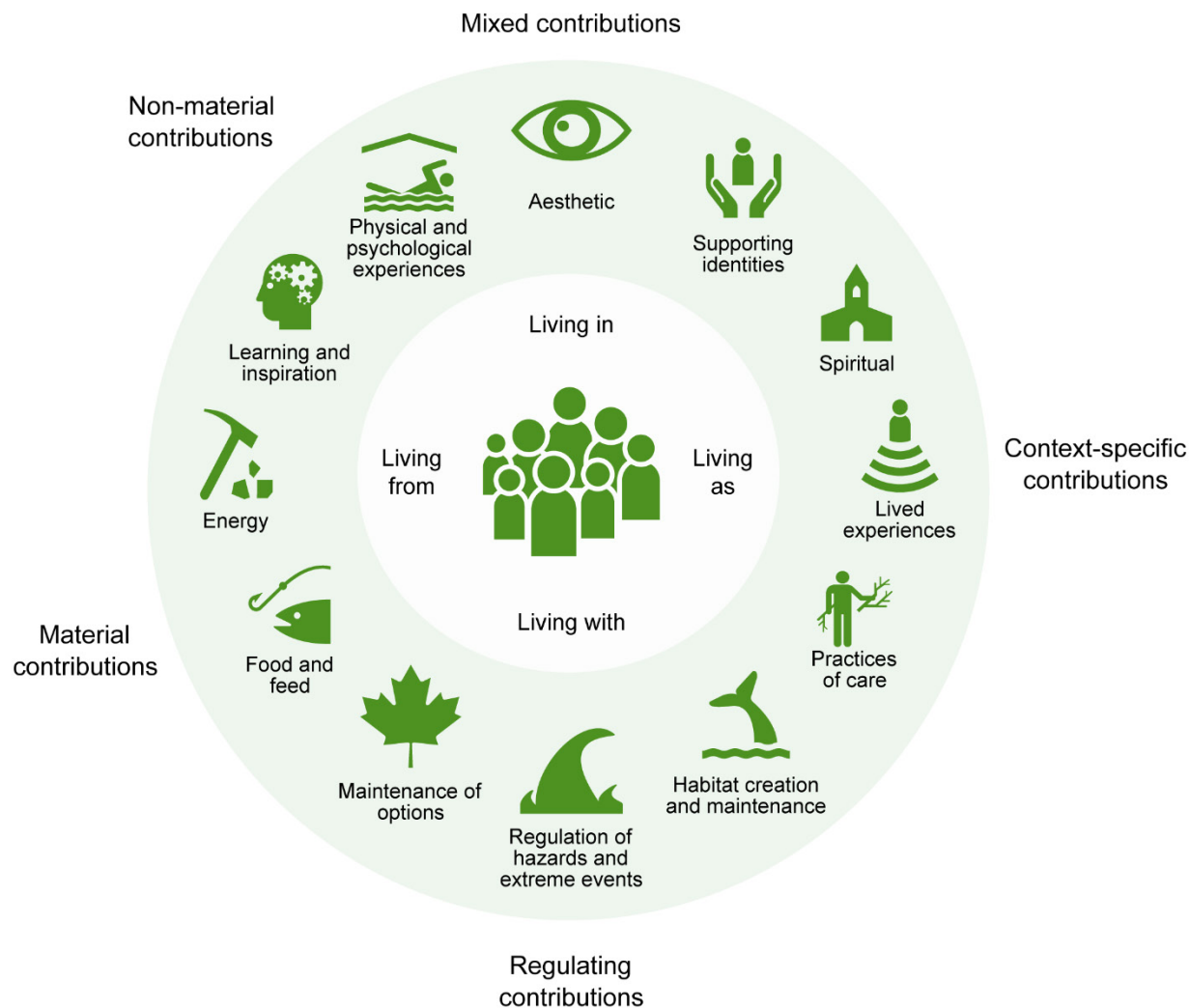
### Mensaje clave 8.3

#### Impactos en los servicios ecosistémicos crea riesgos y oportunidades

El cambio climático está teniendo impactos variables y crecientes en los servicios y beneficios de los ecosistemas, desde la producción de alimentos hasta el agua potable y la retención de carbono, con consecuencias para el bienestar humano (*muy probable, confianza alta*). Los cambios en la disponibilidad y calidad de los servicios ecosistémicos, combinados con las desigualdades sociales existentes, tienen un impacto desproporcionado en determinadas comunidades (*muy probable, confianza alta*). Las soluciones basadas en la naturaleza y orientadas a la equidad, diseñadas para proteger, gestionar y restaurar los ecosistemas para el bienestar humano, pueden ofrecer beneficios de adaptación y mitigación climática (*probable, confianza media*).

Los servicios ecosistémicos aportan contribuciones sustanciales y a menudo económicamente importantes a las comunidades, que van desde beneficios materiales directos, como la producción de alimentos y agua limpia, a beneficios no materiales, como la recreación (Figura 8.17). Sin embargo, la valoración económica por sí sola no refleja los valores intrínsecos o relacionales que las personas tienen hacia la naturaleza<sup>202,203</sup>; por ejemplo, los pueblos tribales e indígenas dependen de los ecosistemas para abastecerse de alimentos culturalmente valiosos, materiales para ceremonias religiosas y vínculos relacionales dentro de las comunidades y entre generaciones (KM 16.1)<sup>204,205</sup>.

## Servicios ecosistémicos y sus beneficios



**Los ecosistemas brindan una amplia variedad de beneficios relacionales, desde los materiales hasta los espirituales.**






**Figura 8.17.** Los servicios ecosistémicos, también denominados “contribuciones de la naturaleza a las personas”, son los beneficios que los seres humanos reciben u obtienen de los ecosistemas. Estos son tanto materiales (p. ej., fuentes de energía) como no materiales (p. ej., sentido del lugar), y contribuyen a la regulación de los procesos de los ecosistemas. Las grandes categorías de beneficios descritas son fluidas y se solapan. La gente valora la naturaleza de múltiples maneras, como “vivir como” la naturaleza (p. ej., puntos de vista indígenas de que los humanos son parte del medio ambiente; Figura 16.3) o “vivir de” la naturaleza (p. ej., dependencia de las personas de servicios clave). Adaptado de O’Connor y Kenter 2019<sup>206</sup> [CC BY 4.0].

Son muchos los efectos adversos del cambio climático sobre los servicios ecosistémicos<sup>207,208</sup>, entre los que se incluyen reducción de la disponibilidad de agua para usos humanos y agrícolas (KM 4.1), disminución de la productividad de las especies cultivadas debido al aumento de las infestaciones de plagas (KM 11.1) y pérdidas de ecosistemas mitigadores de amenazas, como los humedales y las costas, que ofrecen hábitats de cría y anidamiento, recreación y placer estético (Tabla 8.2; KM 9.2). Sin embargo, las tendencias futuras sobre el uso y los beneficios de los ecosistemas no siempre están claras. Por ejemplo, el aumento de las temperaturas puede ampliar las oportunidades recreativas estacionales, pero si las temperaturas máximas diarias superan los 27 °C o 30 °C (80.6 °F u 86 °F), las actividades recreativas tienden a disminuir<sup>209,210</sup>.

Además, la disminución de los beneficios de los servicios ecosistémicos también puede deberse a otros factores<sup>211,212</sup>. Por ejemplo, las prácticas de planificación discriminatorias, la segregación de la vivienda y el racismo han creado distribuciones no equitativas de los servicios, lo que ha llevado a que las comunidades de color experimenten un acceso reducido a beneficios como la mejora de la calidad del aire o la reducción del calor (KM 12.2; Figura 12.6)<sup>213,214,215</sup>. La falta de acceso suele ir acompañada de otros perjuicios medioambientales (p. ej., una mayor exposición a los alérgenos o a los riesgos de gentrificación verde, el desplazamiento de los residentes locales a medida que mejoran los beneficios medioambientales)<sup>216,217</sup>. Se prevé que el cambio climático exacerbe estos impactos<sup>207</sup> y cree más dificultades al abordar el racismo medioambiental, lo que pone de relieve la necesidad de establecer prioridades claras de gestión y reconocer los valores diversos<sup>218,219</sup>.

**Tabla 8.2. Ejemplos de impactos del clima en los servicios ecosistémicos**

**LEYENDA:** El cambio climático afecta la disponibilidad y calidad de muchos servicios ecosistémicos, y muchos de los impactos proyectados sobre importantes servicios ecosistémicos también tendrán implicaciones para la equidad.

Servicio ecosistémico	Impactos climáticos potenciales	Implicaciones para la equidad
 <p>Regulación de los riesgos naturales</p>	Se proyecta el retroceso de los pantanos costeros debido al aumento del nivel del mar y al aumento de las tormentas <sup>220</sup> .	Los riesgos de inundación suelen estar distribuidos de forma poco equitativa; por ejemplo, los riesgos de daños materiales pueden ser desproporcionadamente mayores para las comunidades de raza negra <sup>221</sup> .
 <p>Experiencias físicas y psicológicas</p>	Se proyecta que disminuyan las oportunidades recreativas en condiciones meteorológicas frías (p. ej., menos días de esquí) <sup>209,210,222</sup> .	El menor acceso a los espacios verdes en las comunidades de bajos ingresos y de color ya se traduce en menos oportunidades de recreación <sup>223,224</sup> .
 <p>Cantidad de agua</p>	Se proyecta que los cambios en las precipitaciones, el manto de nieve, la humedad del suelo y la evapotranspiración alteren la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas (KM 4.1; Figura A4.7).	La sequía suele tener impactos dispares <sup>225</sup> ; por ejemplo, las reservas tribales del suroeste de los EE. UU. Con mayor dependencia agrícola se verán particularmente impactadas <sup>226</sup> .
 <p>Regulación de la calidad del aire</p>	Los árboles de las calles aportan considerables beneficios a la calidad del aire urbano, pero son vulnerables a la sequía y al calor <sup>227</sup> .	La distribución actual de las copas de los árboles no es equitativa, lo que provoca una mayor contaminación atmosférica <sup>228,229,230</sup> asociada al legado de la negación de servicios financieros <sup>231</sup> .
 <p>Producción alimentaria (industria pesquera)</p>	Los sistemas acuáticos están experimentando cambios en las áreas de distribución, las fenologías, las distribuciones y las productividades de las especies <sup>232</sup> .	Se proyecta que las especies de importancia cultural, como el salmón Chinook para las tribus del Noroeste del Pacífico, disminuyan drásticamente en el futuro <sup>233</sup> .

## ***Oportunidades para soluciones basadas en la naturaleza***

Las oportunidades de mitigación y adaptación basadas en los ecosistemas suelen denominarse soluciones basadas en la naturaleza (Nature-Based Solutions, NBS) o soluciones climáticas naturales (Figura 8.18)<sup>234,235</sup>. Las NBS apoyan la biodiversidad y pueden proveer otros beneficios cuando se gestionan en colaboración con las comunidades afectadas y el uso de los conocimientos locales (KM 21.1). Por ejemplo, la restauración de humedales costeros ofrece beneficios tanto de mitigación como de adaptación al secuestrar carbono y disminuir las inundaciones costeras, la acción de las olas y la erosión<sup>236</sup>, al tiempo que mejora la calidad del agua y aumenta la biodiversidad del hábitat (KM 9.3; enfoque en carbono azul)<sup>237</sup>. Los proyectos de NBS suelen ser de costo-efectividad alto, lo que estimula nuevas opciones de financiamiento<sup>238,239</sup>.

La adaptación basada en los ecosistemas es un tipo de NBS cuyo objetivo es aumentar la resiliencia de las comunidades al cambio climático mediante el uso de los ecosistemas<sup>240,241</sup>. Algunos ejemplos son la protección y la restauración de llanuras aluviales para reducir el impacto de las inundaciones<sup>242</sup> o ayudar a los agricultores a hacer frente a la sequía mediante medidas de conservación del suelo<sup>243</sup>. La restauración de los ecosistemas costeros, en particular, tiene muy buen retorno de inversión, ya que los arrecifes de coral de los EE. UU. Brindan unos beneficios de adaptación estimados en más de \$1,800 millones anuales (no se ha facilitado el año en dólares)<sup>244,245</sup>. Estos enfoques también pueden tener beneficios positivos para la equidad cuando se diseñan con la participación y el compromiso local a través de enfoques colaborativos (KM 31.4)<sup>246,247,248,249,250,251</sup>.

### Soluciones basadas en la naturaleza

a) Oyster restoration



b) Cover cropping



c) Stormwater management



d) Urban agriculture



Manage and restore soils to reduce emissions and sequester and remove carbon



Provide cooling



Reduce runoff after storm and extreme precipitation events



Protect from erosion



Support biodiversity



Increase access to cultural ecosystem services



Contribute to healthy food systems



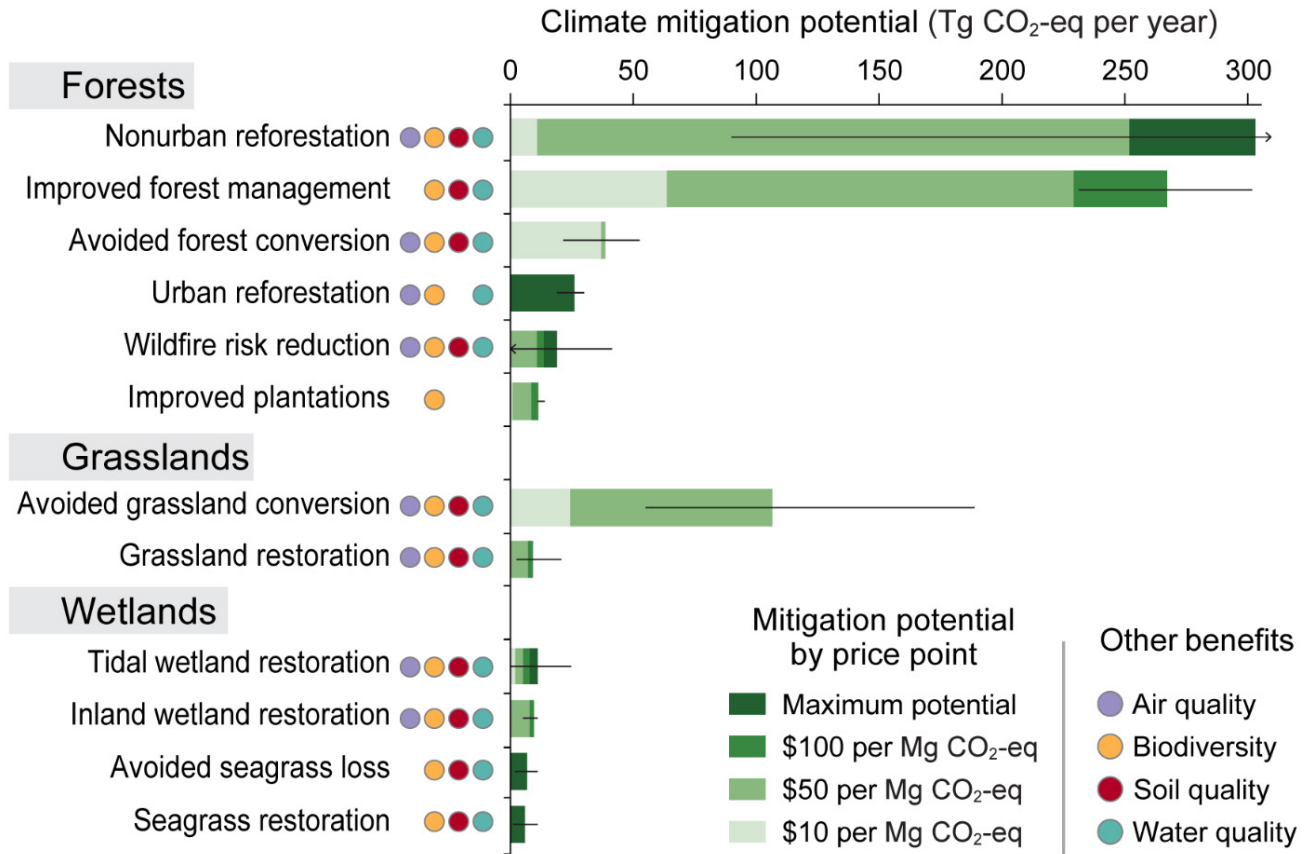
Improve water quality

**Las soluciones basadas en la naturaleza amortiguan los efectos del cambio climático.**

**Figura 8.18.** Las soluciones basadas en la naturaleza (Nature-based Solutions, NBS) son acciones para proteger, gestionar y restaurar los ecosistemas con el fin de abordar retos sociales como el cambio climático. Algunos ejemplos en los EE. UU. son (a) la restauración de ostras; (b) el cultivo de cobertura; (c) la gestión de las aguas pluviales; y (d) la agricultura urbana. Estos no solo ayudan a amortiguar los impactos del cambio climático, por ejemplo mediante barreras físicas o la mejora de los microclimas locales, sino que también aportan beneficios adicionales como suministro de alimentos y hábitats<sup>252,253,254</sup>. Créditos de la figura: Rutgers University y NPS. Consulte los metadatos de las figuras para conocer otros colaboradores. Créditos de las fotografías: (a) Linda Walters, NPS; (b) David Bosch, USDA; (c) Alisha Goldstein, EPA; (d) Bob Nichols, USDA.

Existen oportunidades actuales y futuras para las NBS en todo los Estados Unidos., en particular para las soluciones de mitigación centradas en la protección y el aumento del almacenamiento de carbono por los ecosistemas naturales (Figuras 6.6, 8.19; enfoque en carbono azul)<sup>255</sup>. La planificación de futuras áreas protegidas tanto para el clima como para la biodiversidad podría hacer énfasis en áreas que no solo almacenen grandes cantidades de carbono, sino que también ayuden a las especies a adaptarse<sup>256</sup> mediante el reconocimiento del importante papel que desempeñan muchas especies animales en el ciclo del carbono<sup>257</sup>. Sin embargo, las propias NBS también son vulnerables al aumento de las temperaturas, al aumento del nivel del mar y a otros impactos climáticos<sup>258</sup>.

**Potencial mitigación climática de las soluciones basadas en la naturaleza en 2025**



**Las soluciones basadas en la naturaleza pueden favorecer el almacenamiento de carbono al tiempo que aportan otros beneficios.**

**Figura 8.19.** Las soluciones basadas en la naturaleza (Nature-based Solutions, NBS) pueden preservar o mejorar el almacenamiento de carbono en los suelos y la biomasa en sistemas naturales como bosques, praderas y humedales, así como en tierras agrícolas. Los distintos enfoques varían en cuanto a su potencial de mitigación climática, que aquí se muestra en teragramos de dióxido de carbono equivalente (Tg CO<sub>2</sub>-eq por año; longitud de las barras) en el año 2025. Los tonos verdes más claros indican la parte estimada de mitigación que puede obtenerse por menos de \$10, \$50 o \$100 por megagramo de CO<sub>2</sub>-eq (Mg CO<sub>2</sub>-eq). La categoría verde oscuro “Máximo” muestra el mayor potencial técnico de secuestro de carbono que también es consistente con la satisfacción de las necesidades humanas de alimentos y fibra. Las líneas negras son barras de error que indican el intervalo de confianza del 95 % o un rango de incertidumbre, según la fuente de la estimación. La flecha indica un intervalo que puede superar los valores indicados en el gráfico. También se indican otros beneficios potenciales de las NBS para cada categoría (puntos de color). El gráfico se refiere únicamente a los EE. UU. contiguos. Adaptado de Fargione *et al.* 2018<sup>259</sup> [CC BY 4.0].



Las NBS que involucran la restauración de ecosistemas degradados pueden mejorar la resiliencia<sup>260</sup> y aumentar la provisión de servicios ecosistémicos<sup>261</sup>. Idealmente, la restauración se diseña para recuperar una variedad de beneficios potenciales<sup>262,263</sup>. Sin embargo, no necesariamente se pueden maximizar múltiples servicios de forma simultánea, ya que centrarse en un servicio ecosistémico a expensas de otros beneficios conduce a concesiones mutuas<sup>264,265,266</sup>. Los esfuerzos de restauración a mayor escala suelen tener más éxito cuando se conectan con las prioridades locales<sup>267</sup>, incluido su uso para abordar las desigualdades medioambientales (Recuadro 8.2)<sup>268</sup>.

### Recuadro 8.2. Restauración y gestión de ecosistemas por naciones tribales

Los programas forestales tribales de todo Estados Unidos ofrecen modelos ejemplares de prácticas de gestión de tierras indígenas que ponen de manifiesto la capacidad de las tribus para equilibrar la gestión sostenible del medio ambiente con la satisfacción de las necesidades sociales, ecológicas y económicas de sus comunidades<sup>269</sup>. El concepto de “bosques ancla”, en el que las tribus se sitúan en el centro de múltiples terrenos y actúan como eje principal para aportar infraestructuras de gestión forestal, es un enfoque efectivo. Tales iniciativas maximizan los conceptos de soberanía tribal y conocimiento indígena para restaurar los bosques al ritmo y a la escala necesarias para mitigar el rápido cambio climático y adaptarse a él<sup>270</sup>. Además, las prácticas de gestión indígenas tradicionales y contemporáneas que apoyan tanto las relaciones culturales y espirituales con la naturaleza como una transición climática equitativa pueden servir como conexiones críticas para sostener los ecosistemas (KM 7.3, 16.1)<sup>271</sup>. La incorporación de los conocimientos locales y de los pueblos indígenas en el desarrollo conjunto de las actividades de restauración puede producir beneficios considerables<sup>272</sup>.

## Cuentas trazables

### Descripción del proceso

El autor principal del capítulo, el autor principal de coordinación federal y los autores principales de los capítulos de la agencia analizaron el capítulo sobre ecosistemas de la Cuarta Evaluación Nacional del Clima (Fourth National Climate Assessment, NCA4) y realizaron una lluvia de ideas sobre los temas que habían surgido desde entonces o que no estaban bien cubiertos. El autor principal del capítulo también extrajo las principales brechas identificadas del documento de revisión de la evaluación del Programa de Investigación sobre el Cambio Global de Estados Unidos y de los comentarios públicos. Se elaboró una lista provisional de autores con experiencia en ecosistemas, biodiversidad y servicios ecosistémicos; y sistemas marinos, de agua dulce y terrestres que abarcan regiones de la NCA y tipos de ecosistemas. El equipo final de autores se formó por una mezcla de científicos de agencias federales y expertos académicos con experiencia diversa en evaluaciones y NCA anteriores. Los mensajes clave fueron desarrollados por el equipo de autores completo a través de reuniones virtuales desde el otoño de 2021 hasta la primavera de 2022, con aportes adicionales de un taller de participación pública celebrado en enero de 2022, en el que más de 100 personas participaron de manera virtual para sugerir temas para su revisión por el capítulo. En febrero de 2022 se celebró en línea un taller de participación pública de Diálogos de la Juventud, en colaboración con la Alianza Medioambiental Juvenil en la Enseñanza Superior y el Instituto del Clima de Rutgers. Las revisiones de las agencias federales en el verano de 2022 aportaron nuevas sugerencias de mejora, al igual que los comentarios públicos adicionales y la revisión de las Academias Nacionales en la primavera de 2023. En la reunión presencial de abril de 2023 en Washington, DC, el equipo de autores analizó colectivamente la redacción y los niveles de confianza de los tres mensajes clave para garantizar el consenso en torno a las declaraciones.

Desde la NCA4, se ha publicado una plétora de investigaciones que describen cómo están cambiando los ecosistemas o cómo se espera que sigan cambiando ante el cambio climático y otros factores de estrés, junto con numerosos impactos específicos sobre las especies y los servicios ecosistémicos. Por lo tanto, la base de evidencia de este informe se compone en gran medida de artículos de revistas especializadas publicados en los últimos cinco años.

### Mensaje clave 8.1

## El cambio climático está provocando rápidas transformaciones en los ecosistemas

### Descripción de la base de evidencia

#### Cambios en el régimen de los ecosistemas

Ya hay documentados muchos ejemplos de cambios de régimen resultantes de cambios transformadores, y la base de evidencia es sólida en múltiples tipos de ecosistemas<sup>273</sup>, entre los que se incluyen la transformación de bosques en pastizales o bosques después del aumento de los incendios forestales, la muerte generalizada de pinos piñoneros debido a la sequía y a las plagas de escarabajos de la corteza y la transformación de bosques de algas sanos en erizos de mar debido a enfermedades epizoóticas y olas de calor marinas en entornos marinos cercanos a la costa”plainCitation”:(Stevens-Rumann et al. 2018; Davis et al. 2019; Canadell and Jackson 2021; Harvell et al. 2019; Breshears et al. 2018<sup>144,274,275,276,277,278,279,280</sup>. En general, se esperan cambios de régimen de los ecosistemas templados hacia otros más subtropicales en sus límites meridionales en respuesta a futuras disminuciones de la frecuencia y la intensidad de los eventos de frío extremo<sup>45</sup>. Por ejemplo, se proyecta que los manglares de Florida y de la costa del Golfo de México se extiendan hacia el norte hasta los actuales pantanos de agua salada<sup>43</sup>.

### Supervisión

Estudios sistemáticos sobre biodiversidad, registros digitalizados de museos y recopilación automatizada de datos a largo plazo han demostrado la importancia de contar con múltiples métodos de seguimiento de los cambios medioambientales mediante bases de evidencia sólida<sup>281,282,283,284</sup>.

## Principales incertidumbres y brechas en la investigación

### Complejidad de los impactos en los ecosistemas

La capacidad de predecir respuestas ecológicas a condiciones climáticas cambiantes sigue siendo una brecha clave para la mayoría de los ecosistemas debido a las complejas interacciones entre especies, el potencial de adaptación (tanto a través de respuestas evolutivas como de la actividad humana) y la intersección del cambio climático con otros factores de cambio<sup>36,285,286</sup>. Por ejemplo, unas temperaturas más cálidas pueden provocar no solo un aumento de la regeneración forestal y del crecimiento de los árboles, sino también un aumento de la mortalidad de los árboles más viejos a causa de incendios forestales, insectos y enfermedades, con un impacto neto resultante muy incierto<sup>287</sup>. En general, se espera que los inviernos más cálidos sean beneficiosos para las plagas forestales,<sup>288</sup> pero las complejas interacciones entre las plagas, sus huéspedes y otras perturbaciones pueden hacer que los efectos combinados sean más moderados de lo esperado<sup>289,290,291</sup>. Investigaciones recientes sugieren que múltiples perturbaciones pueden tener efectos contrapuestos, aunque los patrones no siempre están claros, y a veces también se producen efectos combinados intensificados (sinergias)<sup>292,293</sup>.

### Supervisión

Existe una cantidad de brechas en el seguimiento ecológico exhaustivo y a largo plazo para detectar cambios y predecir los riesgos del futuro cambio climático<sup>48</sup>. Un mejor conocimiento de los mecanismos de respuesta biológica que impulsan los cambios ecológicos<sup>36</sup> permitirá anticipar mejor los cambios en los ecosistemas, especialmente en los sistemas dominados por especies longevas y en los que los impactos surgen después de un tiempo determinado<sup>294,295</sup>; esto hace que sea fundamental eliminar las brechas en la supervisión (p. ej., en las regiones árticas y marinas). Los programas de seguimiento comunitario son prometedores, pero pueden estar sesgados (p. ej., por falta de uniformidad en el muestreo) hacia regiones o especies particulares<sup>296</sup>.

### Gestión adaptativa

Aunque la gestión adaptativa está ampliamente considerada como un enfoque efectivo para gestionar la incertidumbre a través del aprendizaje con el fin de conservar, gestionar y restaurar los ecosistemas y las poblaciones de especies<sup>297</sup>, su implementación satisfactoria se ve limitada por la falta de mecanismos de seguimiento efectivos<sup>298</sup>, desafíos para hacer frente a la incertidumbre y la falta de mecanismos institucionales adecuados para su implementación, entre otros problemas<sup>299,300,301,302</sup>. En consecuencia, el enfoque de gobernanza adaptativa se entiende cada vez más como un mecanismo más amplio y prometedor para abordar los requisitos sociales e institucionales de la gestión adaptativa y, al mismo tiempo, facilitar la transformación socioecológica<sup>300,303</sup>. Sin embargo, el enfoque de la gobernanza adaptativa también tiene sus propios desafíos conceptuales y de implementación que deben abordarse para mejorar su éxito, dada la insuficiencia de evidencia sobre su implementación efectiva<sup>298</sup> y dudas sobre su capacidad para provocar cambios transformadores<sup>304</sup>. También existe la posibilidad de que se produzcan resultados no deseados, como una consideración inadecuada de los asuntos sobre poder y equidad social<sup>305,306,307,308</sup>. Además, existen brechas en la investigación sobre la mejora del proceso de transición hacia la gestión y la gobernanza adaptativas y los resultados asociados<sup>309</sup>, así como falta de claridad sobre las sinergias y concesiones mutuas entre los factores determinantes de la capacidad de adaptación y transformación<sup>310,311</sup>.

## Descripción de confianza y probabilidad

Cada vez hay más estudios empíricos de campo y programas de seguimiento que demuestran que el cambio climático, junto con otros factores de estrés, está provocando cambios transformadores en muchos ecosistemas y que estos cambios se acelerarán si continúa el calentamiento (*muy probable, confianza alta*). Dados los crecientes impactos del cambio en los ecosistemas, también se consideraron las importantes implicaciones para el bienestar humano como *muy probables*, y los autores las evaluaron con *confianza alta* dados los estudios empíricos sobre múltiples ecosistemas (es decir, no solo proyecciones) que muestran que ya se está experimentando una variedad de impactos sobre el bienestar en todos los sistemas económicos, culturales y sociales. Como se ha indicado en el Capítulo 2, los eventos extremos están aumentando en frecuencia o severidad, y estos están implicados con mayor frecuencia en los cambios abruptos de los ecosistemas; pero debido a los limitados estudios que examinan la correlación directa de los eventos extremos en las transformaciones abruptas de los ecosistemas, los autores solo los evaluaron con *confianza media*. Los autores también señalaron que los marcos de gobernanza adaptativa, la gestión adaptativa y la supervisión contribuyen a hacer frente a los cambios climáticos, pero, dada la escasez de evidencia de los impactos a largo plazo de la gobernanza adaptativa, los autores solo los evaluaron con *confianza media*.

## Mensaje clave 8.2

### Se aceleran cambios de especies y pérdida de biodiversidad

#### Descripción de la base de evidencia

##### Desplazamientos de áreas de distribución

Los desplazamientos en las áreas de distribución de las especies en respuesta al cambio climático se producen en una amplia variedad de especies y se espera que se aceleren<sup>312,313</sup>. La base de evidencia es sólida en una amplia variedad de especies marinas, vegetales, invertebrados, reptiles, aves y mamíferos; en la Figura 8.11 se muestran ejemplos seleccionados, pero existen muchos más. Además, existe evidencia sólida de que las pautas de los cambios de área de distribución difieren entre los distintos tipos de especies; por ejemplo, varios estudios han demostrado que las especies marinas han ampliado su área de distribución más rápidamente que las terrestres, y que los desplazamientos en la distribución también se han producido con mayor rapidez<sup>314,315</sup>, mientras que las especies terrestres tienden a tener mayores adaptaciones de comportamiento y menor sensibilidad fisiológica a los cambios de temperatura<sup>316,317,318</sup>.

##### Cambios fenológicos

La base de evidencia de respuestas documentadas en la sincronización de los ciclos vitales al cambio climático es sólida, desde el adelanto de las fechas de florecimiento en muchas partes del país hasta los cambios en la hibernación de los mamíferos, pasando por la sincronización de puesta de huevos de las ranas<sup>319,320</sup>. Los cambios muy rápidos pueden observarse fácilmente, por ejemplo, en plantas de vida corta que tienen altas tasas de renovación y una adaptación genética más rápida<sup>321</sup>, lo que refuerza la base de evidencia.

##### Riesgos de extinción

Se necesitan estudios a largo plazo (es decir, décadas) para discernir las huellas del cambio climático en los animales longevos<sup>322</sup>, lo que puede representar un desafío. Pero hay varios impactos en evidencia; por ejemplo, se prevé que el aumento del nivel del mar afecte la disponibilidad y calidad de los lugares de anidamiento para las tortugas marinas, mientras que el calentamiento de las temperaturas puede afectar la proporción de sexos de las crías<sup>323,324</sup>. Los refugios tienen el potencial de mitigar algunos riesgos de extinción para las especies capaces de aprovecharlos, pero la base de evidencia es bastante reciente.

Además, nuevos estudios de modelación han indicado que estas áreas también están en peligro; por ejemplo, Ebersole *et al.* (2020)<sup>127</sup> encontró que en un escenario de calentamiento de 4 °C (7.2 °F) había una probabilidad >50 % de que los refugios para especies de peces de agua dulce disminuyeran en área entre un 42 % y un 77 % para 2070.

### Riesgos de enfermedad

Los riesgos de enfermedad se producen como consecuencia de muchos factores y a través de diferentes huéspedes y patógenos; dado el gran número de riesgos potenciales, los metaanálisis han sido útiles para ofrecer una visión general de la base de evidencia. Una revisión exhaustiva de las enfermedades infecciosas que se propagan entre humanos y animales descubrió que el 58 % de las enfermedades en todo el mundo se han visto exacerbadas por el cambio climático (p. ej., calentamiento, alteración de las precipitaciones e inundaciones)<sup>154</sup>. Solo el 16 % de las enfermedades se vieron disminuidas por el cambio climático. Un análisis global de miles de poblaciones de vida silvestre indicó que el calentamiento climático exagera las enfermedades de la vida silvestre en toda la zona templada del mundo y se espera que aumente las enfermedades de la vida silvestre en Estados Unidos<sup>325</sup>. Un análisis global diferente de 6,801 ensamblajes ecológicos demostró que los ecosistemas dominados por la actividad humana favorecían fuertemente a las especies animales que hospedan patógenos de enfermedades humanas, mientras que disminuía la presencia de animales no huéspedes<sup>326</sup>, una base de evidencia sólida para la conclusión de que los ecosistemas sometidos a estrés tienden a experimentar un mayor riesgo de enfermedad<sup>153</sup>. Muchos ejemplos empíricos de brotes continuos de enfermedades —p. ej., muerte de peces y brotes a gran escala de enfermedades de los corales después de su blanqueamiento— han aumentado en número y son evidencia de sistemas acuáticos perturbados en los que el estrés por enfermedades se ve exacerbado por el calentamiento<sup>144,146</sup>. Los descensos catastróficos bien documentados de las poblaciones de anfibios causados por el hongo invasor quitrido *Batrachochytrium dendrobatidis* también se han relacionado con el calentamiento<sup>327</sup>.

## Principales incertidumbres y brechas en la investigación

### Desplazamientos de áreas de distribución

La velocidad y el alcance de algunos desplazamientos en áreas de distribución de las especies siguen siendo inciertos. Los modelos de envoltura climática utilizan las relaciones actuales entre las áreas de distribución de las especies y las características climáticas para proyectar cómo pueden desplazarse las áreas de distribución ante el cambio climático<sup>328</sup>, sin embargo, asumen necesariamente que el clima es la principal limitación de las áreas de distribución y que las especies responden rápidamente. En realidad, las respuestas de las especies pueden verse retrasadas y limitadas por la capacidad de dispersión, las barreras naturales y creadas por la actividad humana y las interacciones entre especies<sup>329,330</sup>.

Además, se prevé que el cambio climático presente a los organismos nuevas condiciones medioambientales, lo que hace problemáticas las predicciones basadas en relaciones históricas<sup>331</sup>. Específicamente, para mejorar esas predicciones sería necesario comprender mejor en qué medida los desplazamientos en el área de distribución se deben a cambios climáticos a largo plazo frente a eventos meteorológicos extremos periódicos, como las olas de calor, provocados por esos cambios climáticos<sup>86</sup>.

Aunque en la literatura se habla cada vez más de los refugios climáticos, estos son vulnerables a los impactos climáticos y existe incertidumbre sobre su persistencia y resiliencia<sup>126,127</sup>.

### Cambios fenológicos

Se prevé que las respuestas individuales y variables de las especies al cambio climático alteren importantes interacciones biológicas. Muchos de los riesgos que plantean los desajustes emergentes entre especies que interactúan siguen sin estar claros<sup>332</sup>, así como las respuestas de gestión necesarias para reducir los impactos económicos y sociales.

### Enfermedades e invasiones

Los impactos del cambio climático en la salud de las especies son complejos y difíciles de generalizar en todos los sistemas<sup>291</sup>; por ejemplo, el papel del cambio climático entre otros factores de propagación de enfermedades transmitidas por garrapatas, como los cambios en el uso de la tierra o el comportamiento humano, sigue siendo objeto de debate<sup>152,156</sup>.

Los estudios que demuestran que las invasiones podrían verse limitadas en respuesta al cambio climático se basan sobre todo en estudios de especies terrestres cuyos desplazamientos de área de distribución suelen estar limitados por los océanos<sup>169</sup>, lo que indica que se necesitan más investigaciones sobre distintos tipos de especies para mejorar las proyecciones.

### Descripción de confianza y probabilidad

Existe una *confianza alta* en que la interacción del cambio climático con otros factores de estrés lleve de manera *muy probable* a pérdida de biodiversidad, cambios en la distribución y los ciclos vitales de las especies y aumento del impacto de las invasiones y las enfermedades, dada la amplia gama de cambios en las especies que se han documentado en múltiples tipos de ecosistemas, así como las claras consecuencias económicas y sociales en muchas regiones que ya están experimentando estos impactos. La evidencia es sólida, y los autores evaluaron con *confianza alta* que algunas especies, sobre todo las que no pueden reubicarse fácilmente y las que son muy sensibles a la temperatura, se enfrentan a mayores riesgos de extinción, y que estos son *muy probables* dado que las poblaciones de algunas especies ya se encuentran en grave declive con los niveles actuales de calentamiento. Se evaluaron las medidas políticas para ayudar a las especies a adaptarse, y lo que tienen en común es una clara identificación de los riesgos y la priorización de especies y lugares para su protección. La base de evidencia de estas medidas es clara y los autores tienen una *confianza alta* en que tales acciones pueden ampliar y mejorar las opciones de gestión.

## Mensaje clave 8.3

### Impactos en los servicios ecosistémicos crea riesgos y oportunidades

#### Descripción de la base de evidencia

##### Acceso a los servicios ecosistémicos

Existe evidencia sólida de que las comunidades de color experimentan una mayor desigualdad en la contaminación atmosférica<sup>228,229,230,231</sup> en comparación con las comunidades blancas y tienen un acceso reducido o de menor calidad a espacios verdes, árboles y otros ecosistemas que amortiguan estos impactos. El acceso limitado a recursos y servicios también se extiende a las personas con ingresos o riqueza limitados (también conocida como capacidad económica), y estos factores interactúan con la raza y otras jerarquías sociales, incluido el poder, de formas complejas<sup>333</sup>.

##### Impacto del clima en los servicios ecosistémicos

Existe evidencia sólida a escala mundial de que los efectos del calentamiento y de la fertilización por dióxido de carbono ya han alterado algunos servicios ecosistémicos, como el almacenamiento de carbono en las costas y la biodiversidad de los ecosistemas, como se señala en el reciente informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático<sup>2</sup>. En el caso de los EE. UU., aunque no todos los servicios ecosistémicos se han evaluado cuantitativamente por su impacto climático, los que sí se han evaluado muestran ya sea disminuciones observables en la actualidad (p. ej., casi el 40 % de los cultivos dependientes de polinizadores en los EE. UU. sufren una baja abundancia de polinizadores)<sup>334</sup> o proyecciones de declive futuro (p. ej., reducción de las oportunidades de recreación al aire libre para 2050)<sup>210</sup>.

### Restauración

La evidencia de la efectividad de la restauración para mejorar los beneficios de los servicios ecosistémicos aumenta a medida que se lleva a cabo más restauración a escala de paisaje en múltiples ecosistemas<sup>263</sup>. Además, la valoración de los beneficios de los servicios ecosistémicos ha demostrado ser un fuerte impulsor de nuevos programas de restauración, ya que ayuda a identificar ecosistemas potenciales para gestionar o restaurar (p. ej., cómo pueden obtenerse beneficios para la salud de la restauración de sistemas terrestres con vegetación)<sup>262</sup>.

## Principales incertidumbres y brechas en la investigación

### Medición, valoración y gestión de los servicios ecosistémicos

Sigue habiendo dificultades para medir, supervisar y evaluar los impactos y la efectividad de muchos servicios ecosistémicos<sup>335</sup>. En los EE. UU., los espacios urbanos siguen siendo poco investigados, especialmente en las comunidades de color, a pesar de ser a menudo entornos biodiversos<sup>336</sup>, y la investigación actual suele limitarse a estudios de casos específicos de ciudades sobre mediciones y análisis de servicios ecosistémicos, centrándose menos en trabajos comparativos<sup>248,337</sup>. Además, muchos documentos de planificación urbana no incluyen prácticas de adaptación al cambio climático en relación con los servicios culturales o la injusticia medioambiental de forma que se traduzcan en una implementación<sup>338</sup> y, en su lugar, se centran en los recursos físicos y naturales, los costos o la logística<sup>247</sup>. La investigación donde participan las comunidades, los residentes y las pequeñas organizaciones en la identificación y el diseño de mediciones, valoración y criterios de gestión es una brecha persistente, dada la continua falta de investigación participativa de los residentes y de ciencia comunitaria en la identificación de problemas e implementación de soluciones. Unos pocos estudios han relacionado múltiples tipos de servicios ecosistémicos urbanos desde el punto de vista de la planificación teórica<sup>248,337,339</sup>, e integrar la justicia en las prácticas de servicios ecosistémicos al priorizar las necesidades de la comunidad, alinear los métodos de evaluación y los criterios con las metas y abordar el racismo medioambiental es una brecha crítica<sup>247</sup>.

### Restauración

Hay pocos ejemplos de prácticas de restauración ecológica diseñadas para ser resilientes al cambio climático<sup>340,341</sup>, con especiales dificultades para tomar decisiones sobre lo que hay que “restaurar”<sup>342</sup> y a qué condiciones o valores de referencia, así como la forma de minimizar la vulnerabilidad a eventos climáticos extremos que pueden no tener precedentes en la historia reciente. Puede haber desconexiones espaciales entre el lugar donde deben implementarse las acciones de restauración y el lugar donde se observarán las mejoras de los servicios ecosistémicos<sup>343</sup>, y el costo económico de los esfuerzos de restauración y las preferencias de las partes interesadas por los estados deseados pueden impedir los esfuerzos de recuperación<sup>344</sup>.

### Soluciones basadas en la naturaleza (Nature-based Solutions, NBS)

Las NBS podrían provocar riesgos de resultados indeseables si conllevan transformaciones de los ecosistemas o introducciones de especies en grandes extensiones de tierra; por ello, requieren un estudio cuidadoso antes de su implementación para evitar que se agraven las injusticias medioambientales y sociales<sup>345,346</sup>. Cada vez hay más casos de NBS mal diseñadas y una mayor preocupación por los efectos de segundo orden, como la gentrificación verde<sup>216,217</sup>. Sin embargo, existen considerables brechas en la investigación sobre cómo evitar estos resultados. La evidencia sugiere que una mayor participación de las partes interesadas en los proyectos y políticas de eliminación de carbono podría ayudar a maximizar los beneficios de la adaptación<sup>347</sup>, pero este es un campo de investigación en curso.

### Descripción de confianza y probabilidad

Existe una *confianza alta* en que el clima está teniendo impactos variables y crecientes en muchos servicios ecosistémicos, a partir de una literatura en expansión que contiene numerosos ejemplos regionales. Estos cambios se consideran *muy probables* dados los actuales niveles de calentamiento en áreas donde ya se han observado impactos. Existe una *confianza alta* en que estos cambios en la disponibilidad y calidad de los servicios ecosistémicos, combinados con las desigualdades sociales existentes que también están bien documentadas, tendrán un impacto desproporcionado en algunas comunidades. Estos impactos desproporcionados se evaluaron como *muy probables* dado que los impactos ya son visibles, sobre todo en las áreas urbanas. Los autores consideraron *probable* que las soluciones basadas en la naturaleza y diseñadas para ser equitativas puedan aportar beneficios multifuncionales para la adaptación y mitigación climática, aunque solo hay una *confianza media* en que los ejemplos actuales de soluciones basadas en la naturaleza sean capaces de abordar plenamente las necesidades de mitigación y adaptación de forma equitativa, dado el creciente número de evidencia de que en algunos lugares se siguen implementando soluciones basadas en la naturaleza mal diseñadas o poco equitativas.



## Referencias

1. IPBES, 2019: *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Díaz, S., J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman, S.H.M. Butchart, K.M.A. Chan, L.A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S.M. Subramanian, G.F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y.J. Shin, I.J. Visseren-Hamakers, K.J. Willis, and C.N. Zayas, Eds. IPBES Secretariat, Bonn, Germany, 56 pp. [https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes\\_global\\_assessment\\_report\\_summary\\_for\\_policymakers.pdf](https://www.ipbes.net/sites/default/files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf)
2. IPCC, 2022: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3–33. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
3. Pecl, G.T., M.B. Araújo, J.D. Bell, J. Blanchard, T.C. Bonebrake, I.-C. Chen, T.D. Clark, R.K. Colwell, F. Danielsen, B. Evengård, L. Falconi, S. Ferrier, S. Frusher, R.A. Garcia, R.B. Griffis, A.J. Hobday, C. Janion-Scheepers, M.A. Jarzyna, S. Jennings, J. Lenoir, H.I. Linnertved, V.Y. Martin, P.C. McCormack, J. McDonald, N.J. Mitchell, T. Mustonen, J.M. Pandolfi, N. Pettorelli, E. Popova, S.A. Robinson, B.R. Scheffers, J.D. Shaw, C.J.B. Sorte, J.M. Strugnell, J.M. Sunday, M.-N. Tuanmu, A. Vergés, C. Villanueva, T. Wernberg, E. Wapstra, and S.E. Williams, 2017: Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, **355** (6332), eaai9214. <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
4. Finney, C., 2014: *Black Faces, White Spaces: Reimagining the Relationship of African Americans to the Great Outdoors*. UNC Press, Chapel Hill, NC. <https://uncpress.org/book/9781469614489/black-faces-white-spaces/>
5. Whyte, K., 2020: Too late for Indigenous climate justice: Ecological and relational tipping points. *WIREs Climate Change*, **11** (1), e603. <https://doi.org/10.1002/wcc.603>
6. Weiskopf, S.R., M.A. Rubenstein, L.G. Crozier, S. Gaichas, R. Griffis, J.E. Halofsky, K.J. Hyde, T.L. Morelli, J.T. Morissette, R.C. Muñoz, A.J. Pershing, D.L. Peterson, R. Poudel, M.D. Staudinger, A.E. Sutton-Grier, L. Thompson, J. Vose, J.F. Weltzin, and K.P. Whyte, 2020: Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, **733**, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>
7. Prober, S.M., V.A.J. Doerr, L.M. Broadhurst, K.J. Williams, and F. Dickson, 2019: Shifting the conservation paradigm: A synthesis of options for renovating nature under climate change. *Ecological Monographs*, **89** (1), e01333. <https://doi.org/10.1002/ecm.1333>
8. Lipton, D., M. Rubenstein, S.R. Weiskopf, S. Carter, J. Peterson, L. Crozier, M. Fogarty, S. Gaichas, K.J.W. Hyde, T.L. Morelli, J. Morissette, H. Moustahfid, R. Muñoz, R. Poudel, M.D. Staudinger, C. Stock, L. Thompson, R. Waples, and J.F. Weltzin, 2018: Ch. 7. Ecosystems, ecosystem services, and biodiversity. In: *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II*. Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D. Easterling, K. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 268–321. <https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch7>
9. Panetta, A.M., M.L. Stanton, and J. Harte, 2018: Climate warming drives local extinction: Evidence from observation and experimentation. *Science Advances*, **4** (2), 1819. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aqa1819>
10. Román-Palacios, C. and J.J. Wiens, 2020: Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (8), 4211–4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>
11. Parmesan, C., M.D. Morecroft, Y. Trisurat, R. Adrian, G.Z. Anshari, A. Arneth, Q. Gao, P. Gonzalez, R. Harris, J. Price, N. Stevens, and G.H. Talukdar, 2022: Ch. 2. Terrestrial and freshwater ecosystems and their services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 197–377. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.004>
12. Warren, R., J. Price, E. Graham, N. Forstenhaeusler, and J. VanDerWal, 2018: The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science*, **360** (6390), 791–795. <https://doi.org/10.1126/science.aar3646>

13. Doney, S.C., V.J. Fabry, R.A. Feely, and J.A. Kleypas, 2009: Ocean acidification: The other CO<sub>2</sub> problem. *Annual Review of Marine Science*, **1** (1), 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
14. Bradford, J.B., J.L. Betancourt, B.J. Butterfield, S.M. Munson, and T.E. Wood, 2018: Anticipatory natural resource science and management for a changing future. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **16** (5), 295–303. <https://doi.org/10.1002/fee.1806>
15. Malhi, Y., J. Franklin, N. Seddon, M. Solan, M.G. Turner, C.B. Field, and N. Knowlton, 2020: Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
16. Reside, A.E., N. Butt, and V.M. Adams, 2018: Adapting systematic conservation planning for climate change. *Biodiversity and Conservation*, **27** (1), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1442-5>
17. Harris, R.M.B., L.J. Beaumont, T.R. Vance, C.R. Tozer, T.A. Remenyi, S.E. Perkins-Kirkpatrick, P.J. Mitchell, A.B. Nicotra, S. McGregor, N.R. Andrew, M. Letnic, M.R. Kearney, T. Wernberg, L.B. Hutley, L.E. Chambers, M.S. Fletcher, M.R. Keatley, C.A. Woodward, G. Williamson, N.C. Duke, and D.M.J.S. Bowman, 2018: Biological responses to the press and pulse of climate trends and extreme events. *Nature Climate Change*, **8** (7), 579–587. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0187-9>
18. Zhou, S., B. Yu, and Y. Zhang, 2023: Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change. *Science Advances*, **9** (10), 1638. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo1638>
19. Ibanez, T., W.J. Platt, P.J. Bellingham, G. Vieilledent, J. Franklin, P.H. Martin, C. Menkes, D.R. Pérez-Salicrup, J. Russell-Smith, and G. Keppel, 2022: Altered cyclone–fire interactions are changing ecosystems. *Trends in Plant Science*, **27** (12), 1218–1230. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.005>
20. Smith-Martin, C.M., R. Muscarella, R. Ankori-Karlinsky, S. Delzon, S.L. Farrar, M. Salva-Sauri, J. Thompson, J.K. Zimmerman, and M. Uriarte, 2022: Hurricanes increase tropical forest vulnerability to drought. *New Phytologist*, **235** (3), 1005–1017. <https://doi.org/10.1111/nph.18175>
21. Michalak, A.M., E.J. Anderson, D. Beletsky, S. Boland, N.S. Bosch, T.B. Bridgeman, J.D. Chaffin, K. Cho, R. Confesor, I. Daloğlu, J.V. DePinto, M.A. Evans, G.L. Fahnenstiel, L. He, J.C. Ho, L. Jenkins, T.H. Johengen, K.C. Kuo, E. LaPorte, X. Liu, M.R. McWilliams, M.R. Moore, D.J. Posselt, R.P. Richards, D. Scavia, A.L. Steiner, E. Verhamme, D.M. Wright, and M.A. Zagorski, 2013: Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110** (16), 6448–6452. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216006110>
22. Guiterman, C.H., R.M. Gregg, L.A.E. Marshall, J.J. Beckmann, P.J. van Mantgem, D.A. Falk, J.E. Keeley, A.C. Caprio, J.D. Coop, P.J. Fornwalt, C. Haffey, R.K. Hagmann, S.T. Jackson, A.M. Lynch, E.Q. Margolis, C. Marks, M.D. Meyer, H. Safford, A.D. Syphard, A. Taylor, C. Wilcox, D. Carril, C.A.F. Enquist, D. Huffman, J. Iniguez, N.A. Molinari, C. Restaino, and J.T. Stevens, 2022: Vegetation type conversion in the US Southwest: Frontline observations and management responses. *Fire Ecology*, **18** (1), 6. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00131-w>
23. Belote, R.T., C. Carroll, S. Martinuzzi, J. Michalak, J.W. Williams, M.A. Williamson, and G.H. Aplet, 2018: Assessing agreement among alternative climate change projections to inform conservation recommendations in the contiguous United States. *Scientific Reports*, **8** (1), 9441. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27721-6>
24. Michalak, J.L., J.C. Withey, J.J. Lawler, and M.J. Case, 2017: Future climate vulnerability—Evaluating multiple lines of evidence. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **15** (7), 367–376. <https://doi.org/10.1002/fee.1516>
25. Heinze, C., T. Blenckner, H. Martins, D. Rusiecka, R. Döscher, M. Gehlen, N. Gruber, E. Holland, Ø. Hov, F. Joos, J.B.R. Matthews, R. Rørdven, and S. Wilson, 2021: The quiet crossing of ocean tipping points. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (9), e2008478118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2008478118>
26. Selkoe, K.A., T. Blenckner, M.R. Caldwell, L.B. Crowder, A.L. Erickson, T.E. Essington, J.A. Estes, R.M. Fujita, B.S. Halpern, M.E. Hunsicker, C.V. Kappel, R.P. Kelly, J.N. Kittinger, P.S. Levin, J.M. Lynham, M.E. Mach, R.G. Martone, L.A. Mease, A.K. Salomon, J.F. Samhouri, C. Scarborough, A.C. Stier, C. White, and J. Zedler, 2015: Principles for managing marine ecosystems prone to tipping points. *Ecosystem Health and Sustainability*, **1** (5), 1–18. <https://doi.org/10.1890/ehs14-0024.1>
27. Hillebrand, H., I. Donohue, W.S. Harpole, D. Hodapp, M. Kucera, A.M. Lewandowska, J. Merder, J.M. Montoya, and J.A. Freund, 2020: Thresholds for ecological responses to global change do not emerge from empirical data. *Nature Ecology & Evolution*, **4** (11), 1502–1509. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1256-9>

28. Langer, M., T.S. von Deimling, S. Westermann, R. Rolph, R. Rutte, S. Antonova, V. Rachold, M. Schultz, A. Oehme, and G. Grosse, 2023: Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. *Nature Communications*, **14** (1), 1721. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4>
29. Miner, K.R., J. D'Andrilli, R. Mackelprang, A. Edwards, M.J. Malaska, M.P. Waldrop, and C.E. Miller, 2021: Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation. *Nature Climate Change*, **11** (10), 809–819. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01162-y>
30. Schuur, E.A.G., B.W. Abbott, R. Commane, J. Ernakovich, E. Euskirchen, G. Hugelius, G. Grosse, M. Jones, C. Koven, V. Leshyk, D. Lawrence, M.M. Loranty, M. Mauritz, D. Olefeldt, S. Natali, H. Rodenhizer, V. Salmon, C. Schädel, J. Strauss, C. Treat, and M. Turetsky, 2022: Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *Annual Review of Environment and Resources*, **47** (1), 343–371. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>
31. Ratajczak, Z., S.R. Carpenter, A.R. Ives, C.J. Kucharik, T. Ramiadantsoa, M.A. Stegner, J.W. Williams, J. Zhang, and M.G. Turner, 2018: Abrupt change in ecological systems: Inference and diagnosis. *Trends in Ecology & Evolution*, **33** (7), 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.04.013>
32. Marshall, L.A. and D.A. Falk, 2020: Demographic trends in community functional tolerance reflect tree responses to climate and altered fire regimes. *Ecological Applications*, **30** (8), e02197. <https://doi.org/10.1002/eap.2197>
33. Hughes, T.P., J.T. Kerry, A.H. Baird, S.R. Connolly, T.J. Chase, A. Dietzel, T. Hill, A.S. Hoey, M.O. Hoogenboom, M. Jacobson, A. Kerswell, J.S. Madin, A. Mieog, A.S. Paley, M.S. Pratchett, G. Torda, and R.M. Woods, 2019: Global warming impairs stock–recruitment dynamics of corals. *Nature*, **568** (7752), 387–390. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1081-y>
34. Hughes, T.P., J.T. Kerry, A.H. Baird, S.R. Connolly, A. Dietzel, C.M. Eakin, S.F. Heron, A.S. Hoey, M.O. Hoogenboom, G. Liu, M.J. McWilliam, R.J. Pears, M.S. Pratchett, W.J. Skirving, J.S. Stella, and G. Torda, 2018: Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, **556** (7702), 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
35. Williams, J.W., A. Ordonez, and J.-C. Svenning, 2021: A unifying framework for studying and managing climate-driven rates of ecological change. *Nature Ecology & Evolution*, **5** (1), 17–26. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01344-5>
36. Turner, M.G., W.J. Calder, G.S. Cumming, T.P. Hughes, A. Jentsch, S.L. LaDeau, T.M. Lenton, B.N. Shuman, M.R. Turetsky, Z. Ratajczak, J.W. Williams, A.P. Williams, and S.R. Carpenter, 2020: Climate change, ecosystems and abrupt change: Science priorities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190105. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0105>
37. Svejcar, L.N., J.D. Kerby, T.J. Svejcar, B. Mackey, C.S. Boyd, O.W. Baughman, M.D. Madsen, and K.W. Davies, 2023: Plant recruitment in drylands varies by site, year, and seeding technique. *Restoration Ecology*, **31** (2), e13750. <https://doi.org/10.1111/rec.13750>
38. Foley, M.M., R.G. Martone, M.D. Fox, C.V. Kappel, L.A. Mease, A.L. Erickson, B.S. Halpern, K.A. Selkoe, P. Taylor, and C. Scarborough, 2015: Using ecological thresholds to inform resource management: Current options and future possibilities. *Frontiers in Marine Science*, **2**, 95. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00095>
39. Johnstone, J.F., C.D. Allen, J.F. Franklin, L.E. Frelich, B.J. Harvey, P.E. Higuera, M.C. Mack, R.K. Meentemeyer, M.R. Metz, G.L.W. Perry, T. Schoennagel, and M.G. Turner, 2016: Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **14** (7), 369–378. <https://doi.org/10.1002/fee.1311>
40. Hutchison, C., D. Gravel, F. Guichard, and C. Potvin, 2018: Effect of diversity on growth, mortality, and loss of resilience to extreme climate events in a tropical planted forest experiment. *Scientific Reports*, **8** (1), 15443. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33670-x>
41. Isbell, F., D. Craven, J. Connolly, M. Loreau, B. Schmid, C. Beierkuhnlein, T.M. Bezemer, C. Bonin, H. Bruelheide, E. de Luca, A. Ebeling, J.N. Griffin, Q. Guo, Y. Hautier, A. Hector, A. Jentsch, J. Kreyling, V. Lanta, P. Manning, S.T. Meyer, A.S. Mori, S. Naeem, P.A. Niklaus, H.W. Polley, P.B. Reich, C. Roscher, E.W. Seabloom, M.D. Smith, M.P. Thakur, D. Tilman, B.F. Tracy, W.H. van der Putten, J. van Ruijven, A. Weigelt, W.W. Weisser, B. Wilsey, and N. Eisenhauer, 2015: Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, **526** (7574), 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>

42. Farr, E.R., M.R. Johnson, M.W. Nelson, J.A. Hare, W.E. Morrison, M.D. Lettrich, B. Vogt, C. Meaney, U.A. Howson, P.J. Auster, F.A. Borsuk, D.C. Brady, M.J. Cashman, P. Colarusso, J.H. Grabowski, J.P. Hawkes, R. Mercaldo-Allen, D.B. Packer, and D.K. Stevenson, 2021: An assessment of marine, estuarine, and riverine habitat vulnerability to climate change in the Northeast U.S. *PLoS ONE*, **16** (12), e0260654. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260654>
43. Osland, M.J., R.H. Day, and T.C. Michot, 2020: Frequency of extreme freeze events controls the distribution and structure of black mangroves (*Avicennia germinans*) near their northern range limit in coastal Louisiana. *Diversity and Distributions*, **26** (10), 1366–1382. <https://doi.org/10.1111/ddi.13119>
44. Osland, M.J., A.R. Hughes, A.R. Armitage, S.B. Scyphers, J. Cebrian, S.H. Swinea, C.C. Shepard, M.S. Allen, L.C. Feher, J.A. Nelson, C.L. O'Brien, Colt R. Sanspree, D.L. Smee, C.M. Snyder, A.P. Stetter, Philip W. Stevens, K.M. Swanson, L.H. Williams, Janell M. Brush, J. Marchionno, and R. Bardou, 2022: The impacts of mangrove range expansion on wetland ecosystem services in the southeastern United States: Current understanding, knowledge gaps, and emerging research needs. *Global Change Biology*, **28** (10), 3163–3187. <https://doi.org/10.1111/gcb.16111>
45. Osland, M.J., P.W. Stevens, M.M. Lamont, R.C. Brusca, K.M. Hart, J.H. Waddle, C.A. Langtimm, C.M. Williams, B.D. Keim, A.J. Terando, E.A. Reyier, K.E. Marshall, M.E. Loik, R.E. Boucek, A.B. Lewis, and J.A. Seminoff, 2021: Tropicalization of temperate ecosystems in North America: The northward range expansion of tropical organisms in response to warming winter temperatures. *Global Change Biology*, **27** (13), 3009–3034. <https://doi.org/10.1111/gcb.15563>
46. Ury, E.A., X. Yang, J.P. Wright, and E.S. Bernhardt, 2021: Rapid deforestation of a coastal landscape driven by sea-level rise and extreme events. *Ecological Applications*, **31** (5), e02339. <https://doi.org/10.1002/eap.2339>
47. Barnard, P.L., J.E. Dugan, H.M. Page, N.J. Wood, J.A.F. Hart, D.R. Cayan, L.H. Erikson, D.M. Hubbard, M.R. Myers, J.M. Melack, and S.F. Iacobellis, 2021: Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems. *Scientific Reports*, **11** (1), 15560. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94942-7>
48. Malhi, Y., C. Girardin, D.B. Metcalfe, C.E. Doughty, L.E.O.C. Aragão, S.W. Rifai, I. Oliveras, A. Shenkin, J. Aguirre-Gutiérrez, C.A.L. Dahlsjö, T. Riutta, E. Berenguer, S. Moore, W.H. Huasco, N. Salinas, A.C.L. da Costa, L.P. Bentley, S. Adu-Bredu, T.R. Marthews, P. Meir, and O.L. Phillips, 2021: The Global Ecosystems Monitoring network: Monitoring ecosystem productivity and carbon cycling across the tropics. *Biological Conservation*, **253**, 108889. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108889>
49. Scheffer, M., S.R. Carpenter, V. Dakos, and E.H. van Nes, 2015: Generic indicators of ecological resilience: Inferring the chance of a critical transition. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **46** (1), 145–167. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054242>
50. Jones, J.A. and C.T. Driscoll, 2022: Long-term ecological research on ecosystem responses to climate change. *BioScience*, **72** (9), 814–826. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac021>
51. Unger, S., M. Rollins, A. Tietz, and H. Dumais, 2021: iNaturalist as an engaging tool for identifying organisms in outdoor activities. *Journal of Biological Education*, **55** (5), 537–547. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1739114>
52. Crimmins, T., E. Denny, E. Posthumus, A. Rosemartin, R. Croll, M. Montano, and H. Panci, 2022: Science and management advancements made possible by the USA National Phenology network's nature's notebook platform. *BioScience*, **72** (9), 908–920. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac061>
53. Danielsen, F., H. Eicken, M. Funder, N. Johnson, O. Lee, I. Theilade, D. Argyriou, and N.D. Burgess, 2022: Community monitoring of natural resource systems and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, **47** (1), 637–670. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-022325>
54. Pearson, J., G. Jackson, and K.E. McNamara, 2023: Climate-driven losses to Indigenous and local knowledge and cultural heritage. *The Anthropocene Review*, **10** (2), 343–366. <https://doi.org/10.1177/20530196211005482>
55. McKinley, D.C., A.J. Miller-Rushing, H.L. Ballard, R. Bonney, H. Brown, S.C. Cook-Patton, D.M. Evans, R.A. French, J.K. Parrish, T.B. Phillips, S.F. Ryan, L.A. Shanley, J.L. Shirk, K.F. Stepenuck, J.F. Weltzin, A. Wiggins, O.D. Boyle, R.D. Briggs, S.F. Chapin, D.A. Hewitt, P.W. Preuss, and M.A. Soukup, 2017: Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, **208**, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>
56. Currie, D.J. and S. Venne, 2017: Climate change is not a major driver of shifts in the geographical distributions of North American birds. *Global Ecology and Biogeography*, **26** (3), 333–346. <https://doi.org/10.1111/geb.12538>

57. Valle, D., P. Albuquerque, Q. Zhao, A. Barberan, and R.J. Fletcher Jr., 2018: Extending the Latent Dirichlet Allocation model to presence/absence data: A case study on North American breeding birds and biogeographical shifts expected from climate change. *Global Change Biology*, **24** (11), 5560–5572. <https://doi.org/10.1111/gcb.14412>
58. Wang, J., D. Liu, P. Ciais, and J. Peñuelas, 2022: Decreasing rainfall frequency contributes to earlier leaf onset in northern ecosystems. *Nature Climate Change*, **12**, 386–392. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01285-w>
59. Nolan, C., J.T. Overpeck, J.R.M. Allen, P.M. Anderson, J.L. Betancourt, H.A. Binney, S. Brewer, M.B. Bush, B.M. Chase, R. Cheddadi, M. Djamali, J. Dodson, M.E. Edwards, W.D. Gosling, S. Haberle, S.C. Hotchkiss, B. Huntley, S.J. Ivory, A.P. Kershaw, S.-H. Kim, C. Latorre, M. Leydet, A.-M. Lézine, K.-B. Liu, Y. Liu, A.V. Lozhkin, M.S. McGlone, R.A. Marchant, A. Momohara, P.I. Moreno, S. Müller, B.L. Otto-Bliesner, C. Shen, J. Stevenson, H. Takahara, P.E. Tarasov, J. Tipton, A. Vincens, C. Weng, Q. Xu, Z. Zheng, and S.T. Jackson, 2018: Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. *Science*, **361** (6405), 920–923. <https://doi.org/10.1126/science.aan5360>
60. Chambers, J.C., C.R. Allen, and S.A. Cushman, 2019: Operationalizing ecological resilience concepts for managing species and ecosystems at risk. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **7**, 241. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00241>
61. França, F.M., C.E. Benkwitt, G. Peralta, J.P.W. Robinson, N.A.J. Graham, J.M. Tylianakis, E. Berenguer, A.C. Lees, J. Ferreira, J. Louzada, and J. Barlow, 2020: Climatic and local stressor interactions threaten tropical forests and coral reefs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190116. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0116>
62. Schuurman, G.W., C.H. Hoffman, D.N. Cole, D.J. Lawrence, J.M. Morton, D.R. Magness, A.E. Cravens, S. Covington, R. O'Malley, and N.A. Fischelli, 2020: Resist-Accept-Direct (RAD)—A Framework for the 21st-Century Natural Resource Manager. Natural Resource Report. NPS/NRSS/CCRP/NRR—2020/2213. U.S. Department of the Interior, National Park Service, Fort Collins, CO. <https://doi.org/10.36967/nrr-2283597>
63. Akamani, K., 2016: Adaptive water governance: Integrating the human dimensions into water resource governance. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, **158** (1), 2–18. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2016.03215.x>
64. Pahl-Wostl, C., 2019: The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environmental Science & Policy*, **91**, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.008>
65. Pahl-Wostl, C., C. Knieper, E. Lukat, F. Meergans, M. Schoderer, N. Schütze, D. Schweigatz, I. Dombrowsky, A. Lenschow, U. Stein, A. Thiel, J. Tröltzsch, and R. Vidaurre, 2020: Enhancing the capacity of water governance to deal with complex management challenges: A framework of analysis. *Environmental Science & Policy*, **107**, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.011>
66. Akamani, K., 2021: An ecosystem-based approach to climate-smart agriculture with some considerations for social equity. *Agronomy*, **11** (8), 1564. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081564>
67. Hörl, J., K. Keller, and R. Yousefpour, 2020: Reviewing the performance of adaptive forest management strategies with robustness analysis. *Forest Policy and Economics*, **119**, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102289>
68. Akamani, K., 2020: Integrating deep ecology and adaptive governance for sustainable development: Implications for protected areas management. *Sustainability*, **12** (14), 5757. <https://doi.org/10.3390/su12145757>
69. Dietz, T., 2013: Bringing values and deliberation to science communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110** (Supplement\_3), 14081–14087. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212740110>
70. Romsdahl, R., G. Blue, and A. Kirilenko, 2018: Action on climate change requires deliberative framing at local governance level. *Climatic Change*, **149** (3), 277–287. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2240-0>
71. Magness, D.R., L. Hoang, R.T. Belote, J. Brennan, W. Carr, F. Stuart Chapin, III, K. Clifford, W. Morrison, J.M. Morton, and H.R. Sofaer, 2022: Management foundations for navigating ecological transformation by resisting, accepting, or directing social-ecological change. *BioScience*, **72** (1), 30–44. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab083>
72. Lynch, A.J., L.M. Thompson, J.M. Morton, E.A. Beever, M. Clifford, D. Limpinsel, R.T. Magill, D.R. Magness, T.A. Melvin, R.A. Newman, M.T. Porath, F.J. Rahel, J.H. Reynolds, G.W. Schuurman, S.A. Sethi, and J.L. Wilkening, 2022: RAD adaptive management for transforming ecosystems. *BioScience*, **72** (1), 45–56. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab091>
73. Magness, D.R., E. Wagener, E. Yurcich, R. Mollnow, D. Granfors, and J.L. Wilkening, 2022: A multi-scale blueprint for building the decision context to implement climate change adaptation on national wildlife refuges in the United States. *Earth*, **3** (1), 136–156. <https://doi.org/10.3390/earth3010011>

74. West, J.M., C.A. Courtney, A.T. Hamilton, B.A. Parker, D.A. Gibbs, P. Bradley, and S.H. Julius, 2018: Adaptation design tool for climate-smart management of coral reefs and other natural resources. *Environmental Management*, **62** (4), 644–664. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1065-y>
75. West, J.M., C.A. Courtney, A.T. Hamilton, B.A. Parker, S.H. Julius, J. Hoffman, K.H. Koltes, and P. MacGowan, 2017: Climate-smart design for ecosystem management: A test application for coral reefs. *Environmental management*, **59** (1), 102–117. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0774-3>
76. Caro, T., Z. Rowe, J. Berger, P. Wholey, and A. Dobson, 2022: An inconvenient misconception: Climate change is not the principal driver of biodiversity loss. *Conservation Letters*, **15** (3), e12868. <https://doi.org/10.1111/conl.12868>
77. Jaureguiberry, P., N. Titeux, M. Wiemers, D.E. Bowler, L. Coscieme, A.S. Golden, C.A. Guerra, U. Jacob, Y. Takahashi, J. Settele, S. Díaz, Z. Molnár, and A. Purvis, 2022: The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, **8** (45), 9982. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>
78. Pansch, C., M. Scotti, F.R. Barboza, B. Al-Janabi, J. Brakel, E. Briski, B. Bucholz, M. Franz, M. Ito, F. Paiva, M. Saha, Y. Sawall, F. Weinberger, and M. Wahl, 2018: Heat waves and their significance for a temperate benthic community: A near-natural experimental approach. *Global Change Biology*, **24** (9), 4357–4367. <https://doi.org/10.1111/gcb.14282>
79. Peterson Williams, M.J., B. Robbins Gisclair, E. Cerny-Chipman, M. LeVine, and T. Peterson, 2022: The heat is on: Gulf of Alaska Pacific cod and climate-ready fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, **79** (2), 573–583. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab032>
80. Richards, R.A. and M. Hunter, 2021: Northern shrimp *Pandalus borealis* population collapse linked to climate-driven shifts in predator distribution. *PLoS ONE*, **16** (7), e0253914. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253914>
81. Carlson, R.R., S.A. Foo, and G.P. Asner, 2019: Land use impacts on coral reef health: A ridge-to-reef perspective. *Frontiers in Marine Science*, **6**, 562. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00562>
82. Evensen, N.R., Y.-M. Bozec, P.J. Edmunds, and P.J. Mumby, 2021: Scaling the effects of ocean acidification on coral growth and coral-coral competition on coral community recovery. *PeerJ*, **9**, e11608. <https://doi.org/10.7717/peerj.11608>
83. Johnson, M.D., J.J. Scott, M. Leray, N. Lucey, L.M.R. Bravo, W.L. Wied, and A.H. Altieri, 2021: Rapid ecosystem-scale consequences of acute deoxygenation on a Caribbean coral reef. *Nature Communications*, **12** (1), 4522. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24777-3>
84. Magel, J.M.T., J.H.R. Burns, R.D. Gates, and J.K. Baum, 2019: Effects of bleaching-associated mass coral mortality on reef structural complexity across a gradient of local disturbance. *Scientific Reports*, **9** (1), 2512. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37713-1>
85. Sampaio, E., C. Santos, I.C. Rosa, V. Ferreira, H.-O. Pörtner, C.M. Duarte, L.A. Levin, and R. Rosa, 2021: Impacts of hypoxic events surpass those of future ocean warming and acidification. *Nature Ecology & Evolution*, **5** (3), 311–321. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01370-3>
86. Smale, D.A., T. Wernberg, E.C.J. Oliver, M. Thomsen, B.P. Harvey, S.C. Straub, M.T. Burrows, L.V. Alexander, J.A. Benthuyssen, M.G. Donat, M. Feng, A.J. Hobday, N.J. Holbrook, S.E. Perkins-Kirkpatrick, H.A. Scannell, A. Sen Gupta, B.L. Payne, and P.J. Moore, 2019: Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, **9** (4), 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
87. Kelly, L.T., K.M. Giljohann, A. Duane, N. Aquilué, S. Archibald, E. Batllori, A.F. Bennett, S.T. Buckland, Q. Canelles, M.F. Clarke, M.-J. Fortin, V. Hermoso, S. Herrando, R.E. Keane, F.K. Lake, M.A. McCarthy, A. Morán-Ordóñez, C.L. Parr, J.G. Pausas, T.D. Penman, A. Regos, L. Rumpff, J.L. Santos, A.L. Smith, A.D. Syphard, M.W. Tingley, and L. Brotons, 2020: Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science*, **370** (6519), 0355. <https://doi.org/10.1126/science.abb0355>
88. Jager, H.I., J.W. Long, R.L. Malison, B.P. Murphy, A. Rust, L.G.M. Silva, R. Sollmann, Z.L. Steel, M.D. Bowen, J.B. Dunham, J.L. Ebersole, and R.L. Flitcroft, 2021: Resilience of terrestrial and aquatic fauna to historical and future wildfire regimes in western North America. *Ecology and Evolution*, **11** (18), 12259–12284. <https://doi.org/10.1002/ece3.8026>
89. Jones, N.P., L. Kabay, K. Semon Lunz, and D.S. Gilliam, 2021: Temperature stress and disease drives the extirpation of the threatened pillar coral, *Dendrogyra cylindrus*, in southeast Florida. *Scientific Reports*, **11** (1), 14113. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93111-0>
90. Cohen, J.M., M.J. Lajeunesse, and J.R. Rohr, 2018: A global synthesis of animal phenological responses to climate change. *Nature Climate Change*, **8** (3), 224–228. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0067-3>

91. Franklin, K.A., M.A.C. Nicoll, S.J. Butler, K. Norris, N. Ratcliffe, S. Nakagawa, and J.A. Gill, 2022: Individual repeatability of avian migration phenology: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Animal Ecology*, **91** (7), 1416–1430. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13697>
92. Inouye, D.W., 2022: Climate change and phenology. *WIREs Climate Change*, **13** (3), e764. <https://doi.org/10.1002/wcc.764>
93. Bai, H., D. Xiao, H. Zhang, F. Tao, and Y. Hu, 2019: Impact of warming climate, sowing date, and cultivar shift on rice phenology across China during 1981–2010. *International Journal of Biometeorology*, **63** (8), 1077–1089. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01723-z>
94. Liang, L., G.M. Henebry, L. Liu, X. Zhang, and L.-C. Hsu, 2021: Trends in land surface phenology across the conterminous United States (1982–2016) analyzed by NEON domains. *Ecological Applications*, **31** (5), e02323. <https://doi.org/10.1002/eap.2323>
95. Menzel, A., Y. Yuan, M. Matiu, T. Sparks, H. Scheffinger, R. Gehrig, and N. Estrella, 2020: Climate change fingerprints in recent European plant phenology. *Global Change Biology*, **26** (4), 2599–2612. <https://doi.org/10.1111/gcb.15000>
96. Song, Y., C.J. Zajic, T. Hwang, C.R. Hakkenberg, and K. Zhu, 2021: Widespread mismatch between phenology and climate in human-dominated landscapes. *AGU Advances*, **2** (4), e2021AV000431. <https://doi.org/10.1029/2021av000431>
97. Thornton, P.K., P.J. Ericksen, M. Herrero, and A.J. Challinor, 2014: Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, **20** (11), 3313–3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>
98. Anderegg, W.R.L., J.T. Abatzoglou, L.D.L. Anderegg, L. Bielory, P.L. Kinney, and L. Ziska, 2021: Anthropogenic climate change is worsening North American pollen seasons. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (7), e2013284118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013284118>
99. Deutsch, C.A., J.J. Tewksbury, M. Tigchelaar, D.S. Battisti, S.C. Merrill, R.B. Huey, and R.L. Naylor, 2018: Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, **361** (6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
100. Schneider, L., M. Rebetez, and S. Rasmann, 2022: The effect of climate change on invasive crop pests across biomes. *Current Opinion in Insect Science*, **50**, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100895>
101. Li, D., B.J. Stucky, B. Baiser, and R. Guralnick, 2022: Urbanization delays plant leaf senescence and extends growing season length in cold but not in warm areas of the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, **31** (2), 308–320. <https://doi.org/10.1111/geb.13429>
102. Li, D., B.J. Stucky, J. Deck, B. Baiser, and R.P. Guralnick, 2019: The effect of urbanization on plant phenology depends on regional temperature. *Nature Ecology & Evolution*, **3** (12), 1661–1667. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1004-1>
103. Kharouba, H.M., J. Ehrlén, A. Gelman, K. Bolmgren, J.M. Allen, S.E. Travers, and E.M. Wolkovich, 2018: Global shifts in the phenological synchrony of species interactions over recent decades. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115** (20), 5211–5216. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714511115>
104. Visser, M.E. and P. Gienapp, 2019: Evolutionary and demographic consequences of phenological mismatches. *Nature Ecology & Evolution*, **3** (6), 879–885. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0880-8>
105. Heberling, J.M., C. McDonough MacKenzie, J.D. Fridley, S. Kalisz, and R.B. Primack, 2019: Phenological mismatch with trees reduces wildflower carbon budgets. *Ecology Letters*, **22** (4), 616–623. <https://doi.org/10.1111/ele.13224>
106. Richardson, A.D., K. Hufkens, T. Milliman, D.M. Aubrecht, M.E. Furze, B. Seyednasrollah, M.B. Krassovski, J.M. Latimer, W.R. Nettles, R.R. Heiderman, J.M. Warren, and P.J. Hanson, 2018: Ecosystem warming extends vegetation activity but heightens vulnerability to cold temperatures. *Nature*, **560** (7718), 368–371. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0399-1>
107. Lambers, J.H.R., A.F. Cannistra, A. John, E. Lia, R.D. Manzanedo, M. Sethi, J. Sevigny, E.J. Theobald, and J.K. Waugh, 2021: Climate change impacts on natural icons: Do phenological shifts threaten the relationship between peak wildflowers and visitor satisfaction? *Climate Change Ecology*, **2**, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100008>
108. Ojea, E., S.E. Lester, and D. Salgueiro-Otero, 2020: Adaptation of fishing communities to climate-driven shifts in target species. *One Earth*, **2** (6), 544–556. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.012>

109. Fredston, A., M. Pinsky, R.L. Selden, C. Szuwalski, J.T. Thorson, S.D. Gaines, and B.S. Halpern, 2021: Range edges of North American marine species are tracking temperature over decades. *Global Change Biology*, **27** (13), 3145–3156. <https://doi.org/10.1111/gcb.15614>
110. MacLean, S.A. and S.R. Beissinger, 2017: Species' traits as predictors of range shifts under contemporary climate change: A review and meta-analysis. *Global Change Biology*, **23** (10), 4094–4105. <https://doi.org/10.1111/gcb.13736>
111. Pacifici, M., P. Visconti, S.H.M. Butchart, J.E.M. Watson, Francesca M. Cassola, and C. Rondinini, 2017: Species' traits influenced their response to recent climate change. *Nature Climate Change*, **7** (3), 205–208. <https://doi.org/10.1038/nclimate3223>
112. Lenoir, J., R. Bertrand, L. Comte, L. Bourgeaud, T. Hattab, J. Murienne, and G. Grenouillet, 2020: Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology & Evolution*, **4** (8), 1044–1059. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2>
113. Freeman, B.G., J.A. Lee-Yaw, J.M. Sunday, and A.L. Hargreaves, 2018: Expanding, shifting and shrinking: The impact of global warming on species' elevational distributions. *Global Ecology and Biogeography*, **27** (11), 1268–1276. <https://doi.org/10.1111/geb.12774>
114. Graves, T.A., W.M. Janousek, S.M. Gaulke, A.C. Nicholas, D.A. Keinath, C.M. Bell, S. Cannings, R.G. Hatfield, J.M. Heron, J.B. Koch, H.L. Loffland, L.L. Richardson, A.T. Rohde, J. Rykken, J.P. Strange, L.M. Tronstad, and C.S. Sheffield, 2020: Western bumble bee: Declines in the continental United States and range-wide information gaps. *Ecosphere*, **11** (6), e03141. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3141>
115. Lehmann, P., T. Ammunét, M. Barton, A. Battisti, S.D. Eigenbrode, J.U. Jepsen, G. Kalinkat, S. Neuvonen, P. Niemelä, J.S. Terblanche, B. Økland, and C. Björkman, 2020: Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (3), 141–150. <https://doi.org/10.1002/fee.2160>
116. Wagner, D.L., E.M. Grames, M.L. Forister, M.R. Berenbaum, and D. Stopak, 2021: Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (2), e2023989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023989118>
117. Choi, F., T. Gouhier, F. Lima, G. Rilov, R. Seabra, and B. Helmuth, 2019: Mapping physiology: Biophysical mechanisms define scales of climate change impacts. *Conservation Physiology*, **7** (1), 028. <https://doi.org/10.1093/conphys/coz028>
118. Forister, M.L., A.C. McCall, N.J. Sanders, J.A. Fordyce, J.H. Thorne, J. O'Brien, D.P. Waetjen, and A.M. Shapiro, 2010: Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107** (5), 2088–2092. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909686107>
119. Kroeker, K.J., E. Sanford, J.M. Rose, C.A. Blanchette, F. Chan, F.P. Chavez, B. Gaylord, B. Helmuth, T.M. Hill, G.E. Hofmann, M.A. McManus, B.A. Menge, K.J. Nielsen, P.T. Raimondi, A.D. Russell, and L. Washburn, 2016: Interacting environmental mosaics drive geographic variation in mussel performance and predation vulnerability. *Ecology Letters*, **19** (7), 771–779. <https://doi.org/10.1111/ele.12613>
120. McLaughlin, B.C., D.D. Ackerly, P.Z. Klos, J. Natali, T.E. Dawson, and S.E. Thompson, 2017: Hydrologic refugia, plants, and climate change. *Global Change Biology*, **23** (8), 2941–2961. <https://doi.org/10.1111/gcb.13629>
121. Morelli, T.L., C.W. Barrows, A.R. Ramirez, J.M. Cartwright, D.D. Ackerly, T.D. Eaves, J.L. Ebersole, M.A. Krawchuk, B.H. Letcher, M.F. Mahalovich, G.W. Meigs, J.L. Michalak, C.I. Millar, R.M. Quiñones, D. Stralberg, and J.H. Thorne, 2020: Climate-change refugia: Biodiversity in the slow lane. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (5), 228–234. <https://doi.org/10.1002/fee.2189>
122. Salois, S.L., T.C. Gouhier, B. Helmuth, F. Choi, R. Seabra, and F.P. Lima, 2022: Coastal upwelling generates cryptic temperature refugia. *Scientific Reports*, **12** (1), 19313. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23717-5>
123. Stralberg, D., C. Carroll, and S.E. Nielsen, 2020: Toward a climate-informed North American protected areas network: Incorporating climate-change refugia and corridors in conservation planning. *Conservation Letters*, **13** (4), e12712. <https://doi.org/10.1111/conl.12712>
124. Hannah, L., L. Flint, A.D. Syphard, M.A. Moritz, L.B. Buckley, and I.M. McCullough, 2014: Fine-grain modeling of species' response to climate change: Holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in Ecology & Evolution*, **29** (7), 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.006>



125. Peach, M.A., J.B. Cohen, J.L. Frair, B. Zuckerberg, P. Sullivan, W.F. Porter, and C. Lang, 2019: Value of protected areas to avian persistence across 20 years of climate and land-use change. *Conservation Biology*, **33** (2), 423–433. <https://doi.org/10.1111/cobi.13205>
126. Dixon, A.M., P.M. Forster, S.F. Heron, A.M.K. Stoner, and M. Beger, 2022: Future loss of local-scale thermal refugia in coral reef ecosystems. *PLoS Climate*, **1** (2), e0000004. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000004>
127. Ebersole, J.L., R.M. Quiñones, S. Clements, and B.H. Letcher, 2020: Managing climate refugia for freshwater fishes under an expanding human footprint. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (5), 271–280. <https://doi.org/10.1002/fee.2206>
128. Storlazzi, C.D., O.M. Cheriton, R. van Hooidek, Z. Zhao, and R. Brainard, 2020: Internal tides can provide thermal refugia that will buffer some coral reefs from future global warming. *Scientific Reports*, **10** (1), 13435. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70372-9>
129. Tang, C.Q., T. Matsui, H. Ohashi, Y.-F. Dong, A. Momohara, S. Herrando-Moraira, S. Qian, Y. Yang, M. Ohsawa, H.T. Luu, P.J. Grote, P.V. Krestov, L. Ben, M. Werger, K. Robertson, C. Hobohm, C.-Y. Wang, M.-C. Peng, X. Chen, H.-C. Wang, W.-H. Su, R. Zhou, S. Li, L.-Y. He, K. Yan, M.-Y. Zhu, J. Hu, R.-H. Yang, W.-J. Li, M. Tomita, Z.-L. Wu, H.-Z. Yan, G.-F. Zhang, H. He, S.-R. Yi, H. Gong, K. Song, D. Song, X.-S. Li, Z.-Y. Zhang, P.-B. Han, L.-Q. Shen, D.-S. Huang, K. Luo, and J. López-Pujol, 2018: Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia. *Nature Communications*, **9** (1), 4488. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06837-3>
130. Morelli, T.L., C. Daly, S.Z. Dobrowski, D.M. Dulen, J.L. Ebersole, S.T. Jackson, J.D. Lundquist, C.I. Millar, S.P. Maher, W.B. Monahan, K.R. Nydick, K.T. Redmond, S.C. Sawyer, S. Stock, and S.R. Beissinger, 2016: Managing climate change refugia for climate adaptation. *PLoS ONE*, **11** (8), e0159909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159909>
131. Madliger, C.L., C.E. Franklin, O.P. Love, and S.J. Cooke, Eds., 2020: *Conservation Physiology: Applications for Wildlife Conservation and Management*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198843610.001.0001>
132. Royer-Tardif, S., L. Boisvert-Marsh, J. Godbout, N. Isabel, and I. Aubin, 2021: Finding common ground: Toward comparable indicators of adaptive capacity of tree species to a changing climate. *Ecology and Evolution*, **11** (19), 13081–13100. <https://doi.org/10.1002/ece3.8024>
133. Grose, S.O., L. Pendleton, A. Leathers, A. Cornish, and S. Waitai, 2020: Climate change will re-draw the map for marine megafauna and the people who depend on them. *Frontiers in Marine Science*, **7**, 547. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00547>
134. Penn, J.L. and C. Deutsch, 2022: Avoiding ocean mass extinction from climate warming. *Science*, **376** (6592), 524–526. <https://doi.org/10.1126/science.abe9039>
135. Christiansen, F., S.M. Dawson, J.W. Durban, H. Fearnbach, C.A. Miller, L. Bejder, M. Uhart, M. Sironi, P. Corkeron, W. Rayment, E. Leunissen, E. Haria, R. Ward, H.A. Warick, I. Kerr, M.S. Lynn, H.M. Pettis, and M.J. Moore, 2020: Population comparison of right whale body condition reveals poor state of the North Atlantic right whale. *Marine Ecology Progress Series*, **640**, 1–16. <https://doi.org/10.3354/meps13299>
136. Pimiento, C., F. Leprieur, D. Silvestro, J.S. Lefcheck, C. Albouy, D.B. Rasher, M. Davis, J.-C. Svenning, and J.N. Griffin, 2020: Functional diversity of marine megafauna in the Anthropocene. *Science Advances*, **6** (16), 7650. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay7650>
137. Pershing, A.J. and K. Stamieszkin, 2020: The North Atlantic ecosystem, from plankton to whales. *Annual Review of Marine Science*, **12**, 339–359. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010752>
138. Sorochan, K.A., S. Plourde, M.F. Baumgartner, and C.L. Johnson, 2021: Availability, supply, and aggregation of prey (*Calanus* spp.) in foraging areas of the North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*). *ICES Journal of Marine Science*, **78** (10), 3498–3520. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab200>
139. Record, N.R., J.A. Runge, D.E. Pendleton, W.M. Balch, K.T.A. Davies, A.J. Pershing, C.L. Johnson, K. Stamieszkin, R. Ji, Z. Feng, S.D. Kraus, R.D. Kenney, C.A. Hudak, C.A. Mayo, C. Chen, J.E. Salisbury, and C.R.S. Thompson, 2019: Rapid climate-driven circulation changes threaten conservation of endangered North Atlantic right whales. *Oceanography*, **32** (2), 162–169. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.201>
140. Stewart, J.D., J.W. Durban, A.R. Knowlton, M.S. Lynn, H. Fearnbach, J. Barbaro, W.L. Perryman, C.A. Miller, and M.J. Moore, 2021: Decreasing body lengths in North Atlantic right whales. *Current Biology*, **31** (14), 3174–3179. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.04.067>

141. Bullen, C.D., A.A. Campos, E.J. Gregr, I. McKechnie, and K.M.A. Chan, 2021: The ghost of a giant—Six hypotheses for how an extinct megaherbivore structured kelp forests across the North Pacific Rim. *Global Ecology and Biogeography*, **30** (10), 2101–2118. <https://doi.org/10.1111/geb.13370>
142. Buttke, D., M. Wild, R. Monello, G. Schuurman, M. Hahn, and K. Jackson, 2021: Managing wildlife disease under climate change. *EcoHealth*, **18** (4), 406–410. <https://doi.org/10.1007/s10393-021-01542-y>
143. Hale, V.L., P.M. Dennis, D.S. McBride, J.M. Nolting, C. Madden, D. Huey, M. Ehrlich, J. Grieser, J. Winston, D. Lombardi, S. Gibson, L. Saif, M.L. Killian, K. Lantz, R.M. Tell, M. Torchetti, S. Robbe-Austerman, M.I. Nelson, S.A. Faith, and A.S. Bowman, 2022: SARS-CoV-2 infection in free-ranging white-tailed deer. *Nature*, **602** (7897), 481–486. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04353-x>
144. Harvell, C.D., D. Montecino-Latorre, J.M. Caldwell, J.M. Burt, K. Bosley, A. Keller, S.F. Heron, A.K. Salomon, L. Lee, O. Pontier, C. Pattengill-Semmens, and J.K. Gaydos, 2019: Disease epidemic and a marine heat wave are associated with the continental-scale collapse of a pivotal predator (*Pycnopodia helianthoides*). *Science Advances*, **5** (1), 7042. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau7042>
145. Harvell, D., 2019: *Ocean Outbreak: Confronting the Rising Tide of Marine Disease*. University of California Press, 232 pp. <https://www.ucpress.edu/book/9780520382985/ocean-outbreak>
146. Till, A., A.L. Rypel, A. Bray, and S.B. Fey, 2019: Fish die-offs are concurrent with thermal extremes in north temperate lakes. *Nature Climate Change*, **9**, 637–641. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0520-y>
147. Weiskopf, S.R., O.E. Ledee, and L.M. Thompson, 2019: Climate change effects on deer and moose in the Midwest. *The Journal of Wildlife Management*, **83** (4), 769–781. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21649>
148. Cohen, J.M., M.D. Venesky, E.L. Sauer, D.J. Civitello, T.A. McMahon, E.A. Roznik, and J.R. Rohr, 2017: The thermal mismatch hypothesis explains host susceptibility to an emerging infectious disease. *Ecology Letters*, **20** (2), 184–193. <https://doi.org/10.1111/ele.12720>
149. Chaloner, T.M., S.J. Gurr, and D.P. Bebber, 2021: Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, **11** (8), 710–715. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01104-8>
150. Juroszek, P., P. Racca, S. Link, J. Farhumand, and B. Kleinhenz, 2020: Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, **69** (2), 179–193. <https://doi.org/10.1111/ppa.13119>
151. Carlson, C.J., G.F. Albery, C. Merow, C.H. Trisos, C.M. Zipfel, E.A. Eskew, K.J. Olival, N. Ross, and S. Bansal, 2022: Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature*, **607** (7919), 555–562. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>
152. Gilbert, L., 2021: The impacts of climate change on ticks and tick-borne disease risk. *Annual Review of Entomology*, **66** (1), 373–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-052720-094533>
153. Keesing, F. and R.S. Ostfeld, 2021: Impacts of biodiversity and biodiversity loss on zoonotic diseases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (17), e2023540118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023540118>
154. Mora, C., T. McKenzie, I.M. Gaw, J.M. Dean, H. von Hammerstein, T.A. Knudson, R.O. Setter, C.Z. Smith, K.M. Webster, J.A. Patz, and E.C. Franklin, 2022: Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change*, **12** (9), 869–875. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1>
155. Islam, M.R., U. Bulut, T.P. Ferial-Arroyo, M.G. Tyshenko, and T. Oraby, 2022: Modeling the impact of climate change on cervid chronic wasting disease in semi-arid south Texas. *Frontiers in Epidemiology*, **2**, 889280. <https://doi.org/10.3389/fepid.2022.889280>
156. Ogden, N.H., C. Ben Beard, H.S. Ginsberg, and J.I. Tsao, 2021: Possible effects of climate change on ixodid ticks and the pathogens they transmit: Predictions and observations. *Journal of Medical Entomology*, **58** (4), 1536–1545. <https://doi.org/10.1093/jme/tjaa220>
157. Sonenshine, D.E., 2018: Range expansion of tick disease vectors in North America: Implications for spread of tick-borne disease. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15** (3), 478. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030478>
158. Escobar, L.E., J. Escobar-Dodero, and N.B.D. Phelps, 2018: Infectious disease in fish: Global risk of viral hemorrhagic septicemia virus. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **28** (3), 637–655. <https://doi.org/10.1007/s11160-018-9524-3>

159. Taylor, R.A., S.J. Ryan, C.A. Lippi, D.G. Hall, H.A. Narouei-Khandan, J.R. Rohr, and L.R. Johnson, 2019: Predicting the fundamental thermal niche of crop pests and diseases in a changing world: A case study on citrus greening. *Journal of Applied Ecology*, **56** (8), 2057–2068. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13455>
160. Singerman, A. and M.E. Rogers, 2020: The economic challenges of dealing with citrus greening: The case of Florida. *Journal of Integrated Pest Management*, **11** (1), 3. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz037>
161. Fortini, L.B., L.R. Kaiser, L.M. Keith, J. Price, R.F. Hughes, J.D. Jacobi, and J.B. Friday, 2019: The evolving threat of Rapid 'Ōhi'a Death (ROD) to Hawai'i's native ecosystems and rare plant species. *Forest Ecology and Management*, **448**, 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.025>
162. Severud, W.J., M. Petz Giguere, T. Walters, T.J. Garwood, K. Teager, K.M. Marchetto, L. Gustavo R. Oliveira-Santos, S.A. Moore, and T.M. Wolf, 2023: Terrestrial gastropod species-specific responses to forest management: Implications for *Parelaphostrongylus tenuis* transmission to moose. *Forest Ecology and Management*, **529**, 120717. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120717>
163. Walton, C.J., N.K. Hayes, and D.S. Gilliam, 2018: Impacts of a regional, multi-year, multi-species coral disease outbreak in southeast Florida. *Frontiers in Marine Science*, **5**, 323. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00323>
164. Gervais, J.A., R. Kovach, A. Sepulveda, R. Al-Chokhachy, J. Joseph Giersch, and C.C. Muhlfeld, 2020: Climate-induced expansions of invasive species in the Pacific Northwest, North America: A synthesis of observations and projections. *Biological Invasions*, **22** (7), 2163–2183. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02244-2>
165. Seebens, H., S. Bacher, T.M. Blackburn, C. Capinha, W. Dawson, S. Dullinger, P. Genovesi, P.E. Hulme, M. van Kleunen, I. Kühn, J.M. Jeschke, B. Lenzen, A.M. Liebhold, Z. Pattison, J. Pergl, P. Pyšek, M. Winter, and F. Essl, 2021: Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050. *Global Change Biology*, **27** (5), 970–982. <https://doi.org/10.1111/gcb.15333>
166. Hickman, J.E. and M.T. Ler dau, 2013: Biogeochemical impacts of the northward expansion of kudzu under climate change: The importance of ecological context. *Ecosphere*, **4** (10), art121. <https://doi.org/10.1890/es13-00142.1>
167. Stephens, K.L., M.E. Dantzer-Kyer, M.A. Patten, and L. Souza, 2019: Differential responses to global change of aquatic and terrestrial invasive species: Evidences from a meta-analysis. *Ecosphere*, **10** (4), e02680. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2680>
168. Vilizzi, L., G.H. Copp, J.E. Hill, B. Adamovich, L. Aislabie, et al., 2021: A global-scale screening of non-native aquatic organisms to identify potentially invasive species under current and future climate conditions. *Science of The Total Environment*, **788**, 147868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147868>
169. Bellard, C., J.M. Jeschke, B. Leroy, and G.M. Mace, 2018: Insights from modeling studies on how climate change affects invasive alien species geography. *Ecology and Evolution*, **8** (11), 5688–5700. <https://doi.org/10.1002/ece3.4098>
170. Ellison, A.M., D.A. Orwig, M.C. Fitzpatrick, and E.L. Preisser, 2018: The past, present, and future of the hemlock woolly adelgid (*Adelges tsugae*) and its ecological interactions with eastern hemlock (*Tsuga canadensis*) forests. *Insects*, **9** (4), 172. <https://doi.org/10.3390/insects9040172>
171. Alsip, P.J., H. Zhang, M.D. Rowe, E. Rutherford, D.M. Mason, C. Riseng, and Z. Su, 2020: Modeling the interactive effects of nutrient loads, meteorology, and invasive mussels on suitable habitat for Bighead and Silver Carp in Lake Michigan. *Biological Invasions*, **22** (9), 2763–2785. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02296-4>
172. Patrick, D.A., N. Boudreau, Z. Bozic, G.S. Carpenter, D.M. Langdon, S.R. LeMay, S.M. Martin, R.M. Mourse, S.L. Prince, and K.M. Quinn, 2012: Effects of climate change on late-season growth and survival of native and non-native species of watermilfoil (*Myriophyllum* spp.): Implications for invasive potential and ecosystem change. *Aquatic Botany*, **103**, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.06.008>
173. Yamada, S.B., J.L. Fisher, and P.M. Kosro, 2021: Relationship between ocean ecosystem indicators and year class strength of the invasive European green crab (*Carcinus maenas*). *Progress in Oceanography*, **196**, 102618. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102618>
174. Hoffmann, S., 2022: Challenges and opportunities of area-based conservation in reaching biodiversity and sustainability goals. *Biodiversity and Conservation*, **31** (2), 325–352. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02340-2>

175. Kroeker, K.J., M.H. Carr, P.T. Raimondi, J.E. Caselle, L. Washburn, S.R. Palumbi, J.A. Barth, F. Chan, B.A. Menge, K. Milligan, M. Novak, and J.W. White, 2019: Planning for change: Assessing the potential role of marine protected areas and fisheries management approaches for resilience management in a changing ocean. *Oceanography*, **32** (3), 116–125. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2019.318>
176. MassWildlife, 2015: Massachusetts State Wildlife Action Plan 2015. Massachusetts Division of Fisheries and Wildlife, Westborough, MA. <https://www.mass.gov/service-details/state-wildlife-action-plan-swap>
177. Staudinger, M.D., T.L. Morelli, and A.M. Bryan, 2015: Integrating Climate Change into Northeast and Midwest State Wildlife Action Plans. Northeast Climate Science Center, Amherst, MA, 201 pp. <https://necasc.umass.edu/projects/integrating-climate-change-state-wildlife-action-plans>
178. Zimmerer, R., T.L. Morelli, M. Ocana, and J. O'Leary, 2018: The Climate Project Screening Tool Report for the Massachusetts Division of Fisheries and Wildlife's Northeast District. MassWildlife. <https://www.mass.gov/doc/northeast-district-climate-project-screening-tool-report/download>
179. Carroll, C. and R.F. Noss, 2021: Rewilding in the face of climate change. *Conservation Biology*, **35** (1), 155–167. <https://doi.org/10.1111/cobi.13531>
180. Taylor, L., S.P. Saunders, J.X. Wu, B.L. Bateman, J. Grand, W.V. DeLuca, and C.B. Wilsey, 2022: Choice of prioritization method impacts recommendations for climate-informed bird conservation in the United States. *Ecography*, **2022** (12), e06401. <https://doi.org/10.1111/ecog.06401>
181. Keeley, A.T.H., D.D. Ackerly, D.R. Cameron, N.E. Heller, P.R. Huber, C.A. Schloss, J.H. Thorne, and A.M. Merenlender, 2018: New concepts, models, and assessments of climate-wise connectivity. *Environmental Research Letters*, **13** (7), 073002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac85>
182. Besterman, A.F., R.W. Jakuba, W. Ferguson, D. Brennan, J.E. Costa, and L.A. Deegan, 2022: Buying time with runnels: A climate adaptation tool for salt marshes. *Estuaries and Coasts*, **45** (6), 1491–1501. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-01028-8>
183. Wigand, C., T. Ardito, C. Chaffee, W. Ferguson, S. Paton, K. Raposa, C. Vandemoer, and E. Watson, 2017: A climate change adaptation strategy for management of coastal marsh systems. *Estuaries and Coasts*, **40** (3), 682–693. <https://doi.org/10.1007/s12237-015-0003-y>
184. Butt, N., A.L.M. Chauvenet, V.M. Adams, M. Beger, R.V. Gallagher, D.F. Shanahan, M. Ward, J.E.M. Watson, and H.P. Possingham, 2021: Importance of species translocations under rapid climate change. *Conservation Biology*, **35** (3), 775–783. <https://doi.org/10.1111/cobi.13643>
185. Palik, B.J., P.W. Clark, A.W. D'Amato, C. Swanston, and L. Nagel, 2022: Operationalizing forest-assisted migration in the context of climate change adaptation: Examples from the eastern USA. *Ecosphere*, **13** (10), e4260. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4260>
186. Orning, E.K., M.C. Romanski, S. Moore, Y. Chenaux-Ibrahim, J. Hart, and J.L. Belant, 2020: Emigration and first-year movements of initial Wolf translocations to Isle Royale. *Northeastern Naturalist*, **27** (4), 701–708. <https://doi.org/10.1656/045.027.0410>
187. Gonzalez, P., F. Wang, M. Notaro, D.J. Vimont, and J.W. Williams, 2018: Disproportionate magnitude of climate change in United States national parks. *Environmental Research Letters*, **13** (10), 104001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade09>
188. Hoffmann, S., S.D.H. Irl, and C. Beierkuhnlein, 2019: Predicted climate shifts within terrestrial protected areas worldwide. *Nature Communications*, **10** (1), 4787. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12603-w>
189. Wilson, K.L., D.P. Tittensor, B. Worm, and H.K. Lotze, 2020: Incorporating climate change adaptation into marine protected area planning. *Global Change Biology*, **26** (6), 3251–3267. <https://doi.org/10.1111/gcb.15094>
190. Holsinger, L., S.A. Parks, M.-A. Parisien, C. Miller, E. Batllori, and M.A. Moritz, 2019: Climate change likely to reshape vegetation in North America's largest protected areas. *Conservation Science and Practice*, **1** (7), e50. <https://doi.org/10.1111/csp2.50>
191. Suraci, J.P., L.S. Farwell, C.E. Littlefield, P.T. Freeman, L.J. Zachmann, V.A. Landau, J.J. Anderson, and B.G. Dickson, 2023: Achieving conservation targets by jointly addressing climate change and biodiversity loss. *Ecosphere*, **14** (4), e4490. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4490>

192. Lawler, J.J., D.S. Rinnan, J.L. Michalak, J.C. Withey, C.R. Randels, and H.P. Possingham, 2020: Planning for climate change through additions to a national protected area network: Implications for cost and configuration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190117. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0117>
193. Wu, J.X., B.L. Bateman, P.J. Heglund, L. Taylor, A.J. Allstadt, D. Granfors, H. Westerkam, N.L. Michel, and C.B. Wilsey, 2022: U.S. National Wildlife Refuge System likely to see regional and seasonal species turnover in bird assemblages under a 2°C warming scenario. *Ornithological Applications*, **124** (3), 016. <https://doi.org/10.1093/ornithapp/duac016>
194. Wu, J.X., C.B. Wilsey, L. Taylor, and G.W. Schuurman, 2018: Projected avifaunal responses to climate change across the U.S. National Park System. *PLoS ONE*, **13** (3), e0190557. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190557>
195. Froese, R. and J. Schilling, 2019: The nexus of climate change, land use, and conflicts. *Current Climate Change Reports*, **5** (1), 24–35. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00122-1>
196. Koubi, V., 2019: Climate change and conflict. *Annual Review of Political Science*, **22** (1), 343–360. <https://doi.org/10.1146/annurev-polisci-050317-070830>
197. Dubik, B.A., E.C. Clark, T. Young, S.B.J. Zigler, M.M. Provost, M.L. Pinsky, and K. St. Martin, 2019: Governing fisheries in the face of change: Social responses to long-term geographic shifts in a U.S. fishery. *Marine Policy*, **99**, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.10.032>
198. Palacios-Abrantes, J., T.L. Frölicher, G. Reygondeau, U.R. Sumaila, A. Tagliabue, Colette C.C. Wabnitz, and William W.L. Cheung, 2022: Timing and magnitude of climate-driven range shifts in transboundary fish stocks challenge their management. *Global Change Biology*, **28** (7), 2312–2326. <https://doi.org/10.1111/gcb.16058>
199. Berger-Tal, O., D.T. Blumstein, and R.R. Swaisgood, 2020: Conservation translocations: A review of common difficulties and promising directions. *Animal Conservation*, **23** (2), 121–131. <https://doi.org/10.1111/acv.12534>
200. Mach, K.J., C.M. Kraan, W.N. Adger, H. Buhaug, M. Burke, J.D. Fearon, C.B. Field, C.S. Hendrix, J.-F. Maystadt, J. O'Loughlin, P. Roessler, J. Scheffran, K.A. Schultz, and N. von Uexkull, 2019: Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature*, **571** (7764), 193–197. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6>
201. Pinsky, M.L., L.A. Rogers, J.W. Morley, and T.L. Frölicher, 2020: Ocean planning for species on the move provides substantial benefits and requires few trade-offs. *Science Advances*, **6** (50), 8428. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8428>
202. Himes, A. and B. Muraca, 2018: Relational values: The key to pluralistic valuation of ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **35**, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.09.005>
203. Michaelis, A.K., W.C. Walton, D.W. Webster, and L.J. Shaffer, 2021: Cultural ecosystem services enabled through work with shellfish. *Marine Policy*, **132**, 104689. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104689>
204. Dam Lam, R., A. Gasparatos, S. Chakraborty, H. Rivera, and T. Stanley, 2019: Multiple values and knowledge integration in indigenous coastal and marine social-ecological systems research: A systematic review. *Ecosystem Services*, **37**, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100910>
205. Mockta, T.K., P.Z. Fulé, A. Sánchez Meador, T. Padilla, and Y.-S. Kim, 2018: Sustainability of culturally important teepee poles on Mescalero Apache Tribal Lands: Characteristics and climate change effects. *Forest Ecology and Management*, **430**, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.017>
206. O'Connor, S. and J.O. Kenter, 2019: Making intrinsic values work: Integrating intrinsic values of the more-than-human world through the Life Framework of Values. *Sustainability Science*, **14** (5), 1247–1265. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00715-7>
207. Runting, R.K., B.A. Bryan, L.E. Dee, F.J.F. Maseyk, L. Mandle, P. Hamel, K.A. Wilson, K. Yetka, H.P. Possingham, and J.R. Rhodes, 2017: Incorporating climate change into ecosystem service assessments and decisions: A review. *Global Change Biology*, **23** (1), 28–41. <https://doi.org/10.1111/gcb.13457>
208. Warziniack, T., M. Lawson, and S. Karen Dante-Wood, 2018: Ch. 10. Effects of climate change on ecosystem services in the Northern Rockies. In: *Climate Change and Rocky Mountain Ecosystems*. Halofsky, J.E. and D.L. Peterson, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 189–208. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56928-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56928-4_10)

209. Brice, E.M., B.A. Miller, H. Zhang, K. Goldstein, S.N. Zimmer, G.J. Grosklos, P. Belmont, C.G. Flint, J.E. Givens, P.B. Adler, M.W. Brunson, and J.W. Smith, 2020: Impacts of climate change on multiple use management of Bureau of Land Management land in the Intermountain West, USA. *Ecosphere*, **11** (11), e03286. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3286>
210. Wilkins, E.J., Y. Chikamoto, A.B. Miller, and J.W. Smith, 2021: Climate change and the demand for recreational ecosystem services on public lands in the continental United States. *Global Environmental Change*, **70**, 102365. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102365>
211. Martin, D.M., J.A. Specht, M.R. Canick, K.L. Leo, and K. Freeman, 2022: Using decision analysis to integrate habitat and community values for coastal resilience planning. *Estuaries and Coasts*, **45** (2), 331–344. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-00970-x>
212. Meerow, S., 2019: A green infrastructure spatial planning model for evaluating ecosystem service tradeoffs and synergies across three coastal megacities. *Environmental Research Letters*, **14** (12), 125011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab502c>
213. Alves Carvalho Nascimento, L. and V. Shandas, 2021: Integrating diverse perspectives for managing neighborhood trees and urban ecosystem services in Portland, OR (US). *Land*, **10** (1), 48. <https://doi.org/10.3390/land10010048>
214. Herreros-Cantis, P. and T. McPhearson, 2021: Mapping supply of and demand for ecosystem services to assess environmental justice in New York City. *Ecological Applications*, **31** (6), e02390. <https://doi.org/10.1002/eap.2390>
215. Richards, D.R., R.N. Belcher, L.R. Carrasco, P.J. Edwards, S. Fatichi, P. Hamel, M. Masoudi, M.J. McDonnell, N. Peleg, and M.C. Stanley, 2022: Global variation in contributions to human well-being from urban vegetation ecosystem services. *One Earth*, **5** (5), 522–533. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.006>
216. Anguelovski, I., J.J. Connolly, M. Garcia-Lamarca, H. Cole, and H. Pearsall, 2019: New scholarly pathways on green gentrification: What does the urban ‘green turn’ mean and where is it going? *Progress in Human Geography*, **43** (6), 1064–1086. <https://doi.org/10.1177/0309132518803799>
217. Rigolon, A. and J. Németh, 2018: “We’re not in the business of housing:” Environmental gentrification and the nonprofitization of green infrastructure projects. *Cities*, **81**, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.03.016>
218. Hendricks, M.D. and S. Van Zandt, 2021: Unequal protection revisited: Planning for environmental justice, hazard vulnerability, and critical infrastructure in communities of color. *Environmental Justice*, **14** (2), 87–97. <https://doi.org/10.1089/env.2020.0054>
219. Schell, C.J., K. Dyson, T.L. Fuentes, S.D. Roches, N.C. Harris, D.S. Miller, C.A. Woelfle-Erskine, and M.R. Lambert, 2020: The ecological and evolutionary consequences of systemic racism in urban environments. *Science*, **369** (6510), 4497. <https://doi.org/10.1126/science.aay4497>
220. EPA, 2022: EPA’s Report on the Environment (ROE). U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/report-environment>
221. Sanders, B.F., J.E. Schubert, D.T. Kahl, K.J. Mach, D. Brady, A. AghaKouchak, F. Forman, R.A. Matthew, N. Ulibarri, and S.J. Davis, 2023: Large and inequitable flood risks in Los Angeles, California. *Nature Sustainability*, **6** (1), 47–57. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00977-7>
222. Ma, S., C.A. Craig, and S. Feng, 2021: Camping climate resources: The camping climate index in the United States. *Current Issues in Tourism*, **24** (18), 2523–2531. <https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1846503>
223. Nesbitt, L., M.J. Meitner, C. Girling, S.R.J. Sheppard, and Y. Lu, 2019: Who has access to urban vegetation? A spatial analysis of distributional green equity in 10 US cities. *Landscape and Urban Planning*, **181**, 51–79. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.08.007>
224. Spotswood, E.N., M. Benjamin, L. Stoneburner, M.M. Wheeler, E.E. Beller, D. Balk, T. McPhearson, M. Kuo, and R.I. McDonald, 2021: Nature inequity and higher COVID-19 case rates in less-green neighbourhoods in the United States. *Nature Sustainability*, **4** (12), 1092–1098. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00781-9>
225. Stewart, I.T., J. Rogers, and A. Graham, 2020: Water security under severe drought and climate change: Disparate impacts of the recent severe drought on environmental flows and water supplies in central California. *Journal of Hydrology X*, **7**, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100054>
226. Drugova, T., K.R. Curtis, and M.-K. Kim, 2022: The impacts of drought on Southwest tribal economies. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **58** (5), 639–653. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13018>

227. McBride, J.R. and I. Laćan, 2018: The impact of climate-change induced temperature increases on the suitability of street tree species in California (USA) cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, **34**, 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.020>
228. Daouda, M., L. Henneman, J. Goldsmith, M.-A. Kioumourtzoglou, and A. Casey Joan, 2022: Racial/ethnic disparities in nationwide PM<sub>2.5</sub> concentrations: Perils of assuming a linear relationship. *Environmental Health Perspectives*, **130** (7), 077701. <https://doi.org/10.1289/ehp11048>
229. Tessum, C.W., J.S. Apte, A.L. Goodkind, N.Z. Muller, K.A. Mullins, D.A. Paoella, S. Polasky, N.P. Springer, S.K. Thakrar, J.D. Marshall, and J.D. Hill, 2019: Inequity in consumption of goods and services adds to racial-ethnic disparities in air pollution exposure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116** (13), 6001–6006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1818859116>
230. Tessum, C.W., D.A. Paoella, S.E. Chambliss, J.S. Apte, J.D. Hill, and J.D. Marshall, 2021: PM<sub>2.5</sub> pollutants disproportionately and systemically affect people of color in the United States. *Science Advances*, **7** (18), 4491. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4491>
231. Lane, H.M., R. Morello-Frosch, J.D. Marshall, and J.S. Apte, 2022: Historical redlining is associated with present-day air pollution disparities in U.S. cities. *Environmental Science & Technology Letters*, **9** (4), 345–350. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c01012>
232. Staudinger, M.D., A.J. Lynch, S.K. Gaichas, M.G. Fox, D. Gibson-Reinemer, J.A. Langan, A.K. Teffer, S.J. Thackeray, and I.J. Winfield, 2021: How does climate change affect emergent properties of aquatic ecosystems? *Fisheries*, **46** (9), 423–441. <https://doi.org/10.1002/fsh.10606>
233. Crozier, L.G., B.J. Burke, B.E. Chasco, D.L. Widener, and R.W. Zabel, 2021: Climate change threatens Chinook salmon throughout their life cycle. *Communications Biology*, **4** (1), 222. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01734-w>
234. Cohen-Shacham, E., A. Andrade, J. Dalton, N. Dudley, M. Jones, C. Kumar, S. Maginnis, S. Maynard, C.R. Nelson, F.G. Renaud, R. Welling, and G. Walters, 2019: Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, **98**, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.014>
235. Griscom, B.W., J. Adams, P.W. Ellis, R.A. Houghton, G. Lomax, D.A. Miteva, W.H. Schlesinger, D. Shoch, J.V. Siikamäki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R.T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M.R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F.E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg, and J. Fargione, 2017: Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114** (44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
236. Roelvink, F.E., C.D. Storlazzi, A.R. van Dongeren, and S.G. Pearson, 2021: Coral reef restorations can be optimized to reduce coastal flooding hazards. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 653945. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.653945>
237. Morecroft, M.D., S. Duffield, M. Harley, J.W. Pearce-Higgins, N. Stevens, O. Watts, and J. Whitaker, 2019: Measuring the success of climate change adaptation and mitigation in terrestrial ecosystems. *Science*, **366** (6471), 9256. <https://doi.org/10.1126/science.aaw9256>
238. Guerry, A.D., J. Silver, J. Beagle, K. Wyatt, K. Arkema, J. Lowe, P. Hamel, R. Griffin, S. Wolny, E. Plane, M. Griswold, H. Papendick, and J. Sharma, 2022: Protection and restoration of coastal habitats yield multiple benefits for urban residents as sea levels rise. *npj Urban Sustainability*, **2** (1), 13. <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00056-y>
239. Schelske, O., J.R. Bohn, and C. Fitzgerald, 2021: Ch. 19. Insuring natural ecosystems as an innovative conservation funding mechanism: A case study on coral reefs. In: *Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience: New Frameworks for Building Resilience to Disasters*. Eslamian, S. and F. Eslamian, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 435–452. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61278-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61278-8_19)
240. Akamani, K. and T.E. Hall, 2019: Scale and co-management outcomes: Assessing the impact of collaborative forest management on community and household resilience in Ghana. *Heliyon*, **5** (1), e01125. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01125>
241. Jones, H.P., B. Nickel, T. Srebotnjak, W. Turner, M. Gonzalez-Roglich, E. Zavaleta, and D.G. Hole, 2020: Global hotspots for coastal ecosystem-based adaptation. *PLoS ONE*, **15** (5), e0233005. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233005>

242. Peck, A.J., S.L. Adams, A. Armstrong, A.K. Bartlett, M.L. Bortman, A.B. Branco, M.L. Brown, J.L. Donohue, M.o. Kodis, M.J. McCann, and E. Smith, 2022: A new framework for flood adaptation: Introducing the Flood Adaptation Hierarchy. *Ecology and Society*, **27** (4). <https://doi.org/10.5751/es-13544-270405>
243. Donatti, C.I., C.A. Harvey, D. Hole, S.N. Panfil, and H. Schurman, 2020: Indicators to measure the climate change adaptation outcomes of ecosystem-based adaptation. *Climatic Change*, **158** (3), 413–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02565-9>
244. Beck, M.W., N. Heck, S. Narayan, P. Menéndez, B.G. Reguero, S. Bitterwolf, S. Torres-Ortega, G.-M. Lange, K. Pfliegner, V. Pietsch McNulty, and I.J. Losada, 2022: Return on investment for mangrove and reef flood protection. *Ecosystem Services*, **56**, 101440. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101440>
245. Reguero, B.G., C.D. Storlazzi, A.E. Gibbs, J.B. Shope, A.D. Cole, K.A. Cumming, and M.W. Beck, 2021: The value of US coral reefs for flood risk reduction. *Nature Sustainability*, **4** (8), 688–698. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00706-6>
246. Ferreira, V., A.P. Barreira, L. Loures, D. Antunes, and T. Panagopoulos, 2020: Stakeholders' engagement on nature-based solutions: A systematic literature review. *Sustainability*, **12** (2), 640. <https://doi.org/10.3390/su12020640>
247. Hoover, F.-A., S. Meerow, Z.J. Grabowski, and T. McPhearson, 2021: Environmental justice implications of siting criteria in urban green infrastructure planning. *Journal of Environmental Policy & Planning*, **23** (5), 665–682. <https://doi.org/10.1080/1523908x.2021.1945916>
248. Jordan, P., F.-A. Hoover, and M.E. Hopton, 2022: Leveraging ancillary benefits from urban greenspace—A case study of St. Louis, Missouri. *Urban Water Journal*, **19** (3), 314–323. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2021.2001544>
249. Jurjonas, M. and E. Seekamp, 2020: 'A commons before the sea.' Climate justice considerations for coastal zone management. *Climate and Development*, **12** (3), 199–203. <https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1611533>
250. Shi, L., 2020: Beyond flood risk reduction: How can green infrastructure advance both social justice and regional impact? *Socio-Ecological Practice Research*, **2** (4), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s42532-020-00065-0>
251. Vasseur, L., 2021: How ecosystem-based adaptation to climate change can help coastal communities through a participatory approach. *Sustainability*, **13** (4), 2344. <https://doi.org/10.3390/su13042344>
252. Croeser, T., G. Garrard, R. Sharma, A. Ossola, and S. Bekessy, 2021: Choosing the right nature-based solutions to meet diverse urban challenges. *Urban Forestry & Urban Greening*, **65**, 127337. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127337>
253. Howie, A.H. and M.J. Bishop, 2021: Contemporary oyster reef restoration: Responding to a changing world. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **9**, 689915. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.689915>
254. Kaye, J.P. and M. Quemada, 2017: Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **37** (1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
255. Law, B.E., L.T. Berner, P.C. Buotte, D.J. Mildrexler, and W.J. Ripple, 2021: Strategic Forest Reserves can protect biodiversity in the western United States and mitigate climate change. *Communications Earth & Environment*, **2** (1), 254. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00326-0>
256. Carroll, C. and J.C. Ray, 2021: Maximizing the effectiveness of national commitments to protected area expansion for conserving biodiversity and ecosystem carbon under climate change. *Global Change Biology*, **27** (15), 3395–3414. <https://doi.org/10.1111/gcb.15645>
257. Malhi, Y., T. Lander, E. le Roux, N. Stevens, M. Macias-Fauria, L. Wedding, C. Girardin, J.Å. Kristensen, C.J. Sandom, T.D. Evans, J.-C. Svenning, and S. Canney, 2022: The role of large wild animals in climate change mitigation and adaptation. *Current Biology*, **32** (4), R181–R196. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.01.041>
258. Seddon, N., A. Chausson, P. Berry, C.A.J. Girardin, A. Smith, and B. Turner, 2020: Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190120. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>



259. Fargione, J.E., S. Bassett, T. Boucher, S.D. Bridgman, R.T. Conant, S.C. Cook-patton, P.W. Ellis, A. Falcucci, J.W. Fourqurean, T. Gopalakrishna, H. Gu, B. Henderson, M.D. Hurteau, K.D. Kroeger, T. Kroeger, T.J. Lark, S.M. Leavitt, G. Loman, R.I. McDonald, J.P. Megonigal, D.A. Miteva, C.J. Richardson, J. Sanderman, D. Shoch, S.A. Spawn, J.W. Veldman, C.A. Williams, P.B. Woodbury, C. Zganjar, M. Baranski, R.A. Houghton, E. Landis, E. McGlynn, W.H. Schlesinger, J.V. Siikamakiariana, E. Sutton-Grierand, and B.W. Griscom, 2018: Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*, **4** (11), 1869. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1869>
260. Shaver, E.C., E. McLeod, M.Y. Hein, S.R. Palumbi, K. Quigley, T. Vardi, P.J. Mumby, D. Smith, P. Montoya-Maya, E.M. Muller, A.T. Banaszak, I.M. McLeod, and D. Wachenfeld, 2022: A roadmap to integrating resilience into the practice of coral reef restoration. *Global Change Biology*, **28** (16), 4751–4764. <https://doi.org/10.1111/gcb.16212>
261. Taillardat, P., B.S. Thompson, M. Garneau, K. Trottier, and D.A. Friess, 2020: Climate change mitigation potential of wetlands and the cost-effectiveness of their restoration. *Interface Focus*, **10** (5), 20190129. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0129>
262. Kashuba, R., C. Menzie, and L. Martin, 2021: Risk of cardiovascular disease is driven by different combinations of environmental, medical and behavioral factors: Building a conceptual model for cumulative risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, **27** (7), 1902–1925. <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.1925083>
263. McDonald, T., G.D. Gann, J. Jonson, and K.W. Dixon, 2016: International Standards for the Practice of Ecological Restoration—Including Principles and Key Concepts. Society for Ecological Restoration, Washington, DC. [https://seraustralia.com/wheel/image/SER\\_International\\_Standards.pdf](https://seraustralia.com/wheel/image/SER_International_Standards.pdf)
264. Carruthers, T.J.B., E.P. Kiskaddon, M.M. Baustian, K.M. Darnell, L.C. Moss, C.L. Perry, and C. Stagg, 2022: Tradeoffs in habitat value to maximize natural resource benefits from coastal restoration in a rapidly eroding wetland: Is monitoring land area sufficient? *Restoration Ecology*, **30** (4), e13564. <https://doi.org/10.1111/rec.13564>
265. Lavorel, S., B. Locatelli, M.J. Colloff, and E. Bruley, 2020: Co-producing ecosystem services for adapting to climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **375** (1794), 20190119. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0119>
266. Li, R., H. Zheng, P. O'Connor, H. Xu, Y. Li, F. Lu, B.E. Robinson, Z. Ouyang, Y. Hai, and G.C. Daily, 2021: Time and space catch up with restoration programs that ignore ecosystem service trade-offs. *Science Advances*, **7** (14), 8650. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8650>
267. Rossi, R., C. Bisland, L. Sharpe, E. Trentacoste, B. Williams, and S. Yee, 2022: Identifying and aligning ecosystem services and beneficiaries associated with best management practices in Chesapeake Bay watershed. *Environmental Management*, **69** (2), 384–409. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01561-z>
268. Smardon, R., S. Moran, and A.K. Baptiste, 2018: *Revitalizing Urban Waterway Communities: Streams of Environmental Justice*. Routledge, London, UK and New York, USA, 228 pp. <https://www.routledge.com/revitalizing-urban-waterway-communities-streams-of-environmental-justice/smardon-moran-baptiste/p/book/9780367605896>
269. Dockry, M.J. and S.J. Hoagland, 2017: A special issue of the *Journal of Forestry*—Tribal forest management: Innovations for sustainable forest management. *Journal of Forestry*, **115** (5), 339–340. <https://doi.org/10.5849/jof-2017-040>
270. Jacobson, M.A., R. Hajjar, E.J. Davis, and S. Hoagland, 2021: Learning from tribal leadership and the anchor forest concept for implementing cross-boundary forest management. *Journal of Forestry*, **119** (6), 605–617. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvab031>
271. Long, J.W., R.W. Goode, and F.K. Lake, 2020: Recentering ecological restoration with tribal perspectives. *Fremontia*, **48** (1), 14–19. <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/61600>
272. Reyes-García, V., Á. Fernández-Llamazares, P. McElwee, Z. Molnár, K. Öllerer, S.J. Wilson, and E.S. Brondizio, 2019: The contributions of Indigenous Peoples and local communities to ecological restoration. *Restoration Ecology*, **27** (1), 3–8. <https://doi.org/10.1111/rec.12894>
273. Biggs, R., G. D. Peterson, and J. C. Rocha, 2018: The regime shifts database: A framework for analyzing regime shifts in social-ecological systems. *Ecology and Society*, **23** (3), 9. <https://doi.org/10.5751/es-10264-230309>

274. Breshears, D.D., C.J.W. Carroll, M.D. Redmond, A.P. Wion, C.D. Allen, N.S. Cobb, N. Meneses, J.P. Field, L.A. Wilson, D.J. Law, L.M. McCabe, and O. Newell-Bauer, 2018: A dirty dozen ways to die: Metrics and modifiers of mortality driven by drought and warming for a tree species. *Frontiers in Forests and Global Change*, **1**, 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00004>
275. Canadell, J.G. and R.B. Jackson, Eds., 2021: *Ecosystem Collapse and Climate Change*. Springer, Cham, Switzerland, 366 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71330-0>
276. Davis, K.T., S.Z. Dobrowski, P.E. Higuera, Z.A. Holden, T.T. Veblen, M.T. Rother, S.A. Parks, A. Sala, and M.P. Maneta, 2019: Wildfires and climate change push low-elevation forests across a critical climate threshold for tree regeneration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116** (13), 6193–6198. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815107116>
277. Stevens-Rumann, C.S., K.B. Kemp, P.E. Higuera, B.J. Harvey, M.T. Rother, D.C. Donato, P. Morgan, and T.T. Veblen, 2018: Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology Letters*, **21** (2), 243–252. <https://doi.org/10.1111/ele.12889>
278. Guiterman, C.H., E.Q. Margolis, C.D. Allen, D.A. Falk, and T.W. Swetnam, 2018: Long-term persistence and fire resilience of oak shrubfields in dry conifer forests of northern New Mexico. *Ecosystems*, **21** (5), 943–959. <https://www.jstor.org/stable/48719582>
279. O'Connor, C.D., D.A. Falk, and G.M. Garfin, 2020: Projected climate–fire interactions drive forest to shrubland transition on an Arizona Sky Island. *Frontiers in Environmental Science*, **8**, 137. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00137>
280. van Mantgem, P.J., D.A. Falk, E.C. Williams, A.J. Das, and N.L. Stephenson, 2020: The influence of pre–fire growth patterns on post–fire tree mortality for common conifers in western US parks. *International Journal of Wildland Fire*, **29** (6), 513–518. <https://doi.org/10.1071/wf19020>
281. Allen, J.M. and B.A. Bradley, 2016: Out of the weeds? Reduced plant invasion risk with climate change in the continental United States. *Biological Conservation*, **203**, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.015>
282. Crall, A.W., G.J. Newman, C.S. Jarnevich, T.J. Stohlgren, D.M. Waller, and J. Graham, 2010: Improving and integrating data on invasive species collected by citizen scientists. *Biological Invasions*, **12** (10), 3419–3428. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9740-9>
283. Lázaro-Lobo, A., R.D. Lucardi, C. Ramirez-Reyes, and G.N. Ervin, 2021: Region-wide assessment of fine-scale associations between invasive plants and forest regeneration. *Forest Ecology and Management*, **483**, 118930. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118930>
284. Prevéy, J., M. Vellend, N. Rüger, R.D. Hollister, A.D. Bjorkman, I.H. Myers-Smith, S.C. Elmendorf, K. Clark, E.J. Cooper, B. Elberling, A.M. Fosaa, G.H.R. Henry, T.T. Høye, I.S. Jónsdóttir, K. Klanderud, E. Lévesque, M. Mauritz, U. Molau, S.M. Natali, S.F. Oberbauer, Z.A. Panchen, E. Post, S.B. Rumpf, N.M. Schmidt, E.A.G. Schuur, P.R. Semenchuk, T. Troxler, J.M. Welker, and C. Rixen, 2017: Greater temperature sensitivity of plant phenology at colder sites: Implications for convergence across northern latitudes. *Global Change Biology*, **23** (7), 2660–2671. <https://doi.org/10.1111/gcb.13619>
285. Boyd, P.W., S. Collins, S. Dupont, K. Fabricius, J.-P. Gattuso, J. Havenhand, D.A. Hutchins, U. Riebesell, M.S. Rintoul, M. Vichi, H. Biswas, A. Ciotti, K. Gao, M. Gehlen, C.L. Hurd, H. Kurihara, C.M. McGraw, J.M. Navarro, G.E. Nilsson, U. Passow, and H.-O. Pörtner, 2018: Experimental strategies to assess the biological ramifications of multiple drivers of global ocean change—A review. *Global Change Biology*, **24** (6), 2239–2261. <https://doi.org/10.1111/gcb.14102>
286. Turley, C. and J.-P. Gattuso, 2012: Future biological and ecosystem impacts of ocean acidification and their socioeconomic-policy implications. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **4** (3), 278–286. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.05.007>
287. Agne, M.C., P.A. Beedlow, D.C. Shaw, D.R. Woodruff, E.H. Lee, S.P. Cline, and R.L. Comeleo, 2018: Interactions of predominant insects and diseases with climate change in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington, U.S.A. *Forest Ecology and Management*, **409**, 317–332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.004>
288. Seidl, R., D. Thom, M. Kautz, D. Martin-Benito, M. Peltoniemi, G. Vacchiano, J. Wild, D. Ascoli, M. Petr, J. Honkaniemi, M.J. Lexer, V. Trotsiuk, P. Mairota, M. Svoboda, M. Fabrika, T.A. Nagel, and C.P.O. Reyer, 2017: Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, **7** (6), 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>

289. Finch, D.M., J.L. Butler, J.B. Runyon, C.J. Fettig, F.F. Kilkenny, S. Jose, S.J. Frankel, S.A. Cushman, R.C. Cobb, J.S. Dukes, J.A. Hicke, and S.K. Amelon, 2021: Ch. 4. Effects of climate change on invasive species. In: *Invasive Species in Forests and Rangelands of the United States: A Comprehensive Science Synthesis for the United States Forest Sector*. Poland, T.M., T. Patel-Weynand, D.M. Finch, C.F. Miniati, D.C. Hayes, and V.M. Lopez, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 57–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45367-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45367-1_4)
290. Gandhi, K. and R. Hofstetter, Eds., 2021: *Bark Beetle Management, Ecology, and Climate Change*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/c2019-0-04282-3>
291. Jactel, H., J. Koricheva, and B. Castagnyrol, 2019: Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, **35**, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>
292. Lopez, B.E., J.M. Allen, J.S. Dukes, J. Lenoir, M. Vilà, D.M. Blumenthal, E.M. Beaury, E.J. Fusco, B.B. Laginhas, T.L. Morelli, M.W. O'Neill, C.J.B. Sorte, A. Maceda-Veiga, R. Whitlock, and B.A. Bradley, 2022: Global environmental changes more frequently offset than intensify detrimental effects of biological invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (22), e2117389119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117389119>
293. Lucash, M.S., R.M. Scheller, B.R. Sturtevant, E.J. Gustafson, A.M. Kretchun, and J.R. Foster, 2018: More than the sum of its parts: How disturbance interactions shape forest dynamics under climate change. *Ecosphere*, **9** (6), e02293. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2293>
294. Hastings, A., K.C. Abbott, K. Cuddington, T. Francis, G. Gellner, Y.-C. Lai, A. Morozov, S. Petrovskii, K. Scranton, and M.L. Zeeman, 2018: Transient phenomena in ecology. *Science*, **361** (6406), 6412. <https://doi.org/10.1126/science.aat6412>
295. Hughes, T.P., C. Linares, V. Dakos, I.A. van de Leemput, and E.H. van Nes, 2013: Living dangerously on borrowed time during slow, unrecognized regime shifts. *Trends in Ecology & Evolution*, **28** (3), 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.08.022>
296. Tang, B., J.S. Clark, and A.E. Gelfand, 2021: Modeling spatially biased citizen science effort through the eBird database. *Environmental and Ecological Statistics*, **28** (3), 609–630. <https://doi.org/10.1007/s10651-021-00508-1>
297. Olsson, P., V. Galaz, and W.J. Boonstra, 2014: Sustainability transformations: A resilience perspective. *Ecology and Society*, **19** (4). <https://doi.org/10.5751/es-06799-190401>
298. Walker, B., S.R. Carpenter, C. Folke, L. Gunderson, G.D. Peterson, M. Scheffer, M. Schoon, and F.R. Westley, 2020: Navigating the chaos of an unfolding global cycle. *Ecology and Society*, **25** (4). <https://doi.org/10.5751/es-12072-250423>
299. Allen, C.R. and L.H. Gunderson, 2011: Pathology and failure in the design and implementation of adaptive management. *Journal of Environmental Management*, **92** (5), 1379–1384. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.063>
300. Kochskämper, E., T.M. Koontz, and J. Newig, 2021: Systematic learning in water governance: Insights from five local adaptive management projects for water quality innovation. *Ecology and Society*, **26** (1). <https://doi.org/10.5751/es-12080-260122>
301. Peat, M., K. Moon, F. Dyer, W. Johnson, and S.J. Nichols, 2017: Creating institutional flexibility for adaptive water management: Insights from two management agencies. *Journal of Environmental Management*, **202**, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.059>
302. West, S., R. Beilin, and H. Wagenaar, 2019: Introducing a practice perspective on monitoring for adaptive management. *People and Nature*, **1** (3), 387–405. <https://doi.org/10.1002/pan3.10033>
303. Walker, B.H., 2012: A commentary on “Resilience and water governance: Adaptive governance in the Columbia River Basin”. *Ecology and Society*, **17** (4). <https://doi.org/10.5751/es-05422-170429>
304. Eshuis, J. and L. Gerrits, 2021: The limited transformational power of adaptive governance: A study of institutionalization and materialization of adaptive governance. *Public Management Review*, **23** (2), 276–296. <https://doi.org/10.1080/14719037.2019.1679232>
305. Burch, S., A. Gupta, C.Y.A. Inoue, A. Kalfagianni, Å. Persson, A.K. Gerlak, A. Ishii, J. Patterson, J. Pickering, M. Scobie, J. Van der Heijden, J. Vervoort, C. Adler, M. Bloomfield, R. Djalante, J. Dryzek, V. Galaz, C. Gordon, R. Harmon, S. Jinnah, R.E. Kim, L. Olsson, J. Van Leeuwen, V. Ramasar, P. Wapner, and R. Zondervan, 2019: New directions in earth system governance research. *Earth System Governance*, **1**, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2019.100006>

306. Dewulf, A., T. Karpouzoglou, J. Warner, A. Wesselink, F. Mao, J. Vos, P. Tamas, A.E. Groot, A. Heijmans, F. Ahmed, L. Hoang, S. Vij, and W. Buytaert, 2019: The power to define resilience in social-hydrological systems: Toward a power-sensitive resilience framework. *WIREs Water*, **6** (6), e1377. <https://doi.org/10.1002/wat2.1377>
307. Koontz, T.M., D. Gupta, P. Mudliar, and P. Ranjan, 2015: Adaptive institutions in social-ecological systems governance: A synthesis framework. *Environmental Science & Policy*, **53**, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.01.003>
308. Morrison, T.H., W.N. Adger, K. Brown, M.C. Lemos, D. Huitema, J. Phelps, L. Evans, P. Cohen, A.M. Song, R. Turner, T. Quinn, and T.P. Hughes, 2019: The black box of power in polycentric environmental governance. *Global Environmental Change*, **57**, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101934>
309. Fedele, G., C.I. Donatti, C.A. Harvey, L. Hannah, and D.G. Hole, 2019: Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy*, **101**, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.001>
310. Barnes, M.L., P. Wang, J.E. Cinner, N.A.J. Graham, A.M. Guerrero, L. Jasny, J. Lau, S.R. Sutcliffe, and J. Zamborain-Mason, 2020: Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nature Climate Change*, **10** (9), 823–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0871-4>
311. Wilson, R.S., A. Herziger, M. Hamilton, and J.S. Brooks, 2020: From incremental to transformative adaptation in individual responses to climate-exacerbated hazards. *Nature Climate Change*, **10** (3), 200–208. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0691-6>
312. Anderegg, W.R.L., L.D.L. Anderegg, K.L. Kerr, and A.T. Trugman, 2019: Widespread drought-induced tree mortality at dry range edges indicates that climate stress exceeds species' compensating mechanisms. *Global Change Biology*, **25** (11), 3793–3802. <https://doi.org/10.1111/gcb.14771>
313. Ralston, J., W.V. DeLuca, R.E. Feldman, and D.I. King, 2017: Population trends influence species ability to track climate change. *Global Change Biology*, **23** (4), 1390–1399. <https://doi.org/10.1111/gcb.13478>
314. Pinsky, M.L., R.L. Selden, and Z.J. Kitchel, 2020: Climate-driven shifts in marine species ranges: Scaling from organisms to communities. *Annual Review of Marine Science*, **12** (1), 153–179. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010916>
315. Poloczanska, E.S., C.J. Brown, W.J. Sydeman, W. Kiessling, D.S. Schoeman, P.J. Moore, K. Brander, J.F. Bruno, L.B. Buckley, M.T. Burrows, C.M. Duarte, B.S. Halpern, J. Holding, C.V. Kappel, M.I. O'Connor, J.M. Pandolfi, C. Parmesan, F. Schwing, S.A. Thompson, and A.J. Richardson, 2013: Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, **3** (10), 919–925. <https://doi.org/10.1038/nclimate1958>
316. Kinlan, B.P. and S.D. Gaines, 2003: Propagule dispersal in marine and terrestrial environments: A community perspective. *Ecology*, **84** (8), 2007–2020. <https://doi.org/10.1890/01-0622>
317. Pinsky, M.L., A.M. Eikeset, D.J. McCauley, J.L. Payne, and J.M. Sunday, 2019: Greater vulnerability to warming of marine versus terrestrial ectotherms. *Nature*, **569** (7754), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1132-4>
318. Robinson, L.M., J. Elith, A.J. Hobday, R.G. Pearson, B.E. Kendall, H.P. Possingham, and A.J. Richardson, 2011: Pushing the limits in marine species distribution modelling: Lessons from the land present challenges and opportunities. *Global Ecology and Biogeography*, **20** (6), 789–802. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00636.x>
319. Arietta, A.Z.A., L.K. Freidenburg, M.C. Urban, S.B. Rodrigues, A. Rubinstein, and D.K. Skelly, 2020: Phenological delay despite warming in wood frog *Rana sylvatica* reproductive timing: A 20-year study. *Ecography*, **43** (12), 1791–1800. <https://doi.org/10.1111/ecog.05297>
320. Johnson, H.E., D.L. Lewis, T.L. Verzuh, C.F. Wallace, R.M. Much, L.K. Willmarth, and S.W. Breck, 2018: Human development and climate affect hibernation in a large carnivore with implications for human-carnivore conflicts. *Journal of Applied Ecology*, **55** (2), 663–672. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13021>
321. Büntgen, U., A. Piermattei, P.J. Krusic, J. Esper, T. Sparks, and A. Crivellaro, 2022: Plants in the UK flower a month earlier under recent warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **289** (1968), 20212456. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.2456>
322. Orgeret, F., A. Thiebault, K.M. Kovacs, C. Lydersen, M.A. Hindell, S.A. Thompson, W.J. Sydeman, and P.A. Pistorius, 2022: Climate change impacts on seabirds and marine mammals: The importance of study duration, thermal tolerance and generation time. *Ecology Letters*, **25** (1), 218–239. <https://doi.org/10.1111/ele.13920>

323. Maurer, A.S., K. Gross, and S.P. Stapleton, 2022: Beached Sargassum alters sand thermal environments: Implications for incubating sea turtle eggs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **546**, 151650. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2021.151650>
324. Ware, M., S.A. Ceriani, J.W. Long, and M.M.P.B. Fuentes, 2021: Exposure of loggerhead sea turtle nests to waves in the Florida Panhandle. *Remote Sensing*, **13** (14), 2654. <https://doi.org/10.3390/rs13142654>
325. Cohen, J.M., E.L. Sauer, O. Santiago, S. Spencer, and J.R. Rohr, 2020: Divergent impacts of warming weather on wildlife disease risk across climates. *Science*, **370** (6519), eabb1702. <https://doi.org/10.1126/science.abb1702>
326. Gibb, R., D.W. Redding, K.Q. Chin, C.A. Donnelly, T.M. Blackburn, T. Newbold, and K.E. Jones, 2020: Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature*, **584** (7821), 398–402. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2562-8>
327. Fisher, M.C. and T.W.J. Garner, 2020: Chytrid fungi and global amphibian declines. *Nature Reviews Microbiology*, **18** (6), 332–343. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0335-x>
328. Elith, J. and J.R. Leathwick, 2009: Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **40** (1), 677–697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
329. Midgley, G.F., W. Thuiller, and S.I. Higgins, 2007: Ch. 11. Plant species migration as a key uncertainty in predicting future impacts of climate change on ecosystems: Progress and challenges. In: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Canadell, J.G., D.E. Pataki, and L.F. Pitelka, Eds. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 129–137. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32730-1_11)
330. Moullec, F., N. Barrier, S. Drira, F. Guilhaumon, T. Hattab, M.A. Peck, and Y.-J. Shin, 2022: Using species distribution models only may underestimate climate change impacts on future marine biodiversity. *Ecological Modelling*, **464**, 109826. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109826>
331. Hoveka, L.N., M. van der Bank, and T.J. Davies, 2022: Winners and losers in a changing climate: How will protected areas conserve red list species under climate change? *Diversity and Distributions*, **28** (4), 782–792. <https://doi.org/10.1111/ddi.13488>
332. Samplonius, J.M., A. Atkinson, C. Hassall, K. Keogan, S.J. Thackeray, J.J. Assmann, M.D. Burgess, J. Johansson, K.H. Macphie, J.W. Pearce-Higgins, E.G. Simmonds, Ø. Varpe, J.C. Weir, D.Z. Childs, E.F. Cole, F. Daunt, T. Hart, O.T. Lewis, N. Pettorelli, B.C. Sheldon, and A.B. Phillimore, 2021: Strengthening the evidence base for temperature-mediated phenological asynchrony and its impacts. *Nature Ecology & Evolution*, **5** (2), 155–164. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01357-0>
333. Thomas, K., R.D. Hardy, H. Lazrus, M. Mendez, B. Orlove, I. Rivera-Collazo, J.T. Roberts, M. Rockman, B.P. Warner, and R. Winthrop, 2019: Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *WIREs Climate Change*, **10** (2), e565. <https://doi.org/10.1002/wcc.565>
334. Winkler, K.J., M.C. Dade, and J.T. Rieb, 2021: Mismatches in the ecosystem services literature—A review of spatial, temporal, and functional-conceptual mismatches. *Current Landscape Ecology Reports*, **6** (2), 23–34. <https://doi.org/10.1007/s40823-021-00063-2>
335. Heris, M., K.J. Bagstad, C. Rhodes, A. Troy, A. Middel, K.G. Hopkins, and J. Matuszak, 2021: Piloting urban ecosystem accounting for the United States. *Ecosystem Services*, **48**, 101226. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101226>
336. Aronson, M.F., C.A. Lepczyk, K.L. Evans, M.A. Goddard, S.B. Lerman, J.S. MacIvor, C.H. Nilon, and T. Vargo, 2017: Biodiversity in the city: Key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **15** (4), 189–196. <https://doi.org/10.1002/fee.1480>
337. Meerow, S. and J.P. Newell, 2017: Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, **159**, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.10.005>
338. Grabowski, Z.J., T. McPhearson, A.M. Matsler, P. Groffman, and S.T.A. Pickett, 2022: What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **20** (3), 152–160. <https://doi.org/10.1002/fee.2445>
339. Hoover, F.-A. and M.E. Hopton, 2019: Developing a framework for stormwater management: Leveraging ancillary benefits from urban greenspace. *Urban Ecosystems*, **22** (6), 1139–1148. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00890-6>

340. Shriver, R.K., C.M. Andrews, D.S. Pilliod, R.S. Arkle, J.L. Welty, M.J. Germino, M.C. Duniway, D.A. Pyke, and J.B. Bradford, 2018: Adapting management to a changing world: Warm temperatures, dry soil, and interannual variability limit restoration success of a dominant woody shrub in temperate drylands. *Global Change Biology*, **24** (10), 4972–4982. <https://doi.org/10.1111/gcb.14374>
341. Simonson, W.D., E. Miller, A. Jones, S. García-Rangel, H. Thornton, and C. McOwen, 2021: Enhancing climate change resilience of ecological restoration—A framework for action. *Perspectives in Ecology and Conservation*, **19** (3), 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.05.002>
342. Hobbs, R.J., 2016: Degraded or just different? Perceptions and value judgements in restoration decisions. *Restoration Ecology*, **24** (2), 153–158. <https://doi.org/10.1111/rec.12336>
343. Opperman, J.J. and G.E. Galloway, 2022: Nature-based solutions for managing rising flood risk and delivering multiple benefits. *One Earth*, **5** (5), 461–465. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.012>
344. Lynham, J., B.S. Halpern, T. Blenckner, T. Essington, J. Estes, M. Hunsicker, C. Kappel, A.K. Salomon, C. Scarborough, K.A. Selkoe, and A. Stier, 2017: Costly stakeholder participation creates inertia in marine ecosystems. *Marine Policy*, **76**, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.11.011>
345. Aidoo, F.S., 2021: Architectures of mis/managed retreat: Black land loss to green housing gains. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **11** (3), 451–464. <https://doi.org/10.1007/s13412-021-00684-3>
346. Heck, S., 2021: Greening the color line: Historicizing water infrastructure redevelopment and environmental justice in the St. Louis metropolitan region. *Journal of Environmental Policy & Planning*, **23** (5), 565–580. <https://doi.org/10.1080/1523908x.2021.1888702>
347. Buck, H.J., J. Furhman, D.R. Morrow, D.L. Sanchez, and F.M. Wang, 2020: Adaptation and carbon removal. *One Earth*, **3** (4), 425–435. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.008>