

# Bosques





# Capítulo 7. Bosques

## Autores y colaboradores

### Autor principal de coordinación federal

**Christopher J. Fettig**, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station

### Autor principal del capítulo

**Grant M. Domke**, USDA Forest Service, Northern Research Station

### Autor principal del capítulo de la agencia

**Anne S. Marsh**, USDA Forest Service, Washington Office

### Autores del capítulo

**Michelle Baumflek**, USDA Forest Service, Southern Research Station

**William A. Gould**, USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry

**Jessica E. Halofsky**, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station

**Linda A. Joyce**, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station

**Stephen D. LeDuc**, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development

**David H. Levinson**, USDA Forest Service, National Stream and Aquatic Ecology Center

**Jeremy S. Littell**, US Geological Survey, Alaska Climate Adaptation Science Center

**Chelcy F. Miniat**, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station

**Miranda H. Mockrin**, USDA Forest Service, Northern Research Station

**David L. Peterson**, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station

**Jeffrey Prestemon**, USDA Forest Service, Southern Research Station

**Benjamin M. Sleeter**, US Geological Survey, Western Geographic Science Center

**Chris Swanston**, USDA Forest Service, Washington Office

### Contribuyentes técnicos

**Ning Liu**, USDA Forest Service, Southern Research Station

**D. Max Smith**, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station

**Brian F. Walters**, USDA Forest Service, Northern Research Station

### Editor revisor

**Brooke Eastman**, West Virginia University, Department of Biology

### Arte de apertura de capítulo

**Jenny Helbraun Abramson**

### Cita recomendada

Domke, G.M., C.J. Fettig, A.S. Marsh, M. Baumflek, W.A. Gould, J.E. Halofsky, L.A. Joyce, S.D. LeDuc, D.H. Levinson, J.S. Littell, C.F. Miniat, M.H. Mockrin, D.L. Peterson, J. Prestemon, B.M. Sleeter, and C. Swanston, 2023: Cap. 7. Bosques. 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.CH7.ES>

# Índice de Contenidos

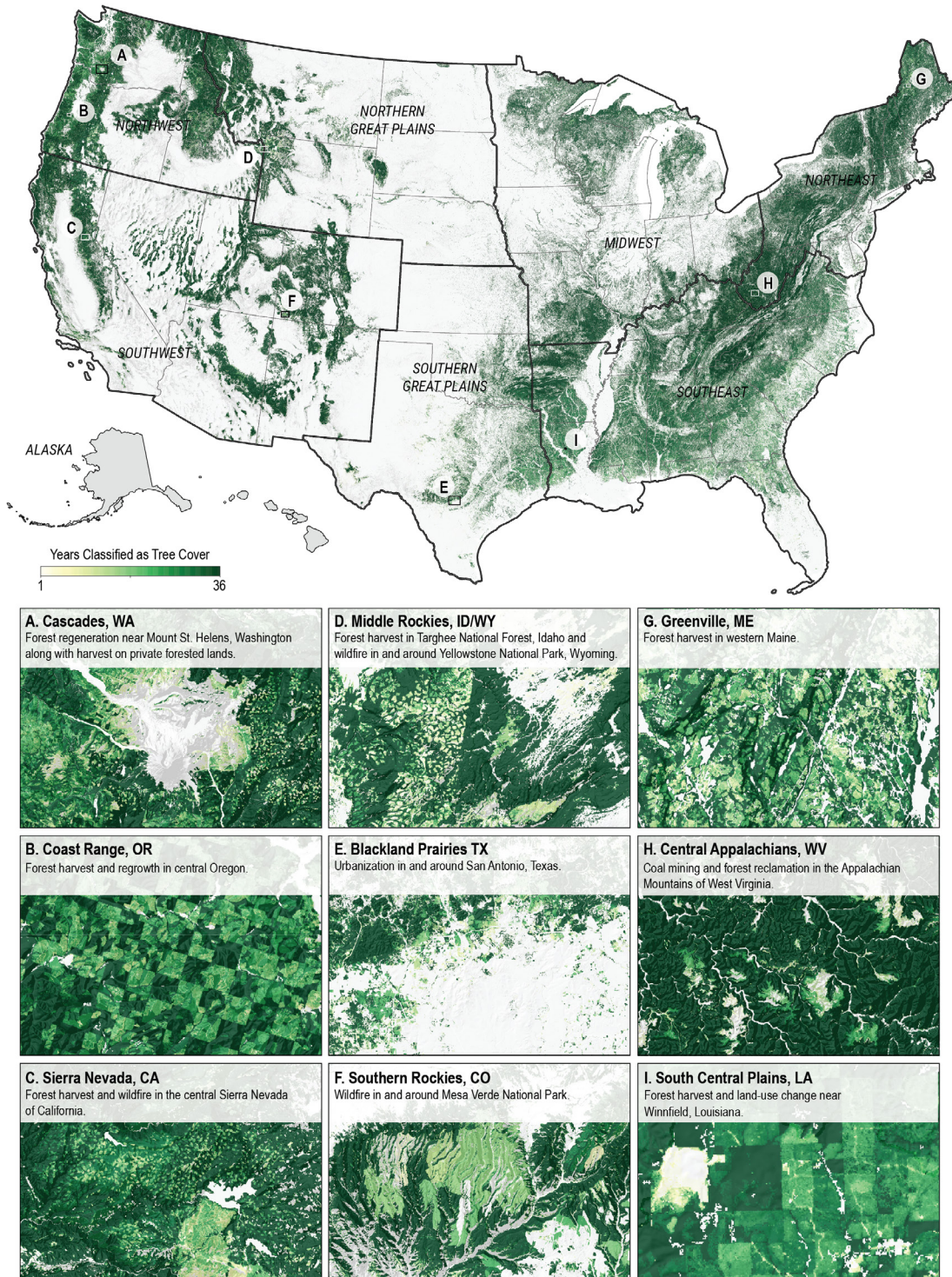
<b>Introducción .....</b>	<b>4</b>
Mensaje clave 7.1	
<b>El cambio climático y las perturbaciones afectan cada vez más los bosques .....</b>	<b>7</b>
Recuadro 7.1. Escarabajos de la corteza y cambio climático.....	12
Mensaje clave 7.2	
<b>El cambio climático afecta los servicios ecosistémicos que los bosques aportan .....</b>	<b>13</b>
Recuadro 7.2. Bosques y carbono.....	16
Recuadro 7.3 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos forestales .....	18
Mensaje clave 7.3	
<b>Las medidas de adaptación son necesarias para mantener ecosistemas forestales resilientes .....</b>	<b>20</b>
<b>Cuentas trazables.....</b>	<b>25</b>
Descripción del proceso .....	25
Mensaje clave 7.1.....	25
Mensaje clave 7.2.....	27
Mensaje clave 7.3.....	28
<b>Referencias .....</b>	<b>30</b>

## Introducción

Los ecosistemas forestales ofrecen bienes y servicios ecológicos, económicos y sociales (en adelante, servicios ecosistémicos) a los sistemas naturales y a la humanidad. Entre ellos se incluyen la purificación del aire; la regulación de la cantidad y calidad del agua; el suministro de hábitat para peces y vida silvestre, alimentos, medicinas, refugio, madera y otros productos forestales; el aprovisionamiento de estética, recreación al aire libre y renovación espiritual; y la regulación del clima mediante transferencias de carbono y otros procesos<sup>1</sup>. Los medios de subsistencia, la salud, la nutrición y las prácticas y tradiciones culturales de muchos pueblos indígenas y tribales dependen de los ecosistemas forestales (Capítulo 16). Los factores sociales y económicos influyen en cómo y cuándo se manejan los bosques para mantener o restaurar los servicios ecosistémicos fundamentales para la salud y el bienestar humanos.

Los bosques representan más de un tercio (766 millones de acres) de la base terrestre en los EE. UU., con otros 125 millones de acres de árboles fuera de los bosques en zonas arboladas y urbanizadas. La cantidad de cobertura forestal y arbórea ha permanecido relativamente estable durante los últimos 100 años, a pesar de los cambios sustanciales en el uso de la tierra hacia y desde la cobertura forestal y arbórea, especialmente en décadas recientes (Figuras 7.1, 6.2)<sup>2</sup>. El área de tierra forestal y la cobertura arbórea han disminuido ligeramente en los EE. UU. contiguos en las dos últimas décadas debido principalmente a la expansión de las tierras de cultivo y la urbanización (Figura 6.4)<sup>3,4</sup>, incluida la expansión de la interfaz urbano-forestal (Wildland–Urban Interface, WUI)<sup>5</sup>. Los bosques aportaron más del 4 % del producto interno bruto manufacturero total de los EE. UU. en 2020 (casi \$336,000 millones en 2022), y la industria de productos forestales se encuentra entre los 10 principales empleadores del sector manufacturero en los EE. UU.<sup>6</sup>.

## Dinámica de la cobertura arbórea



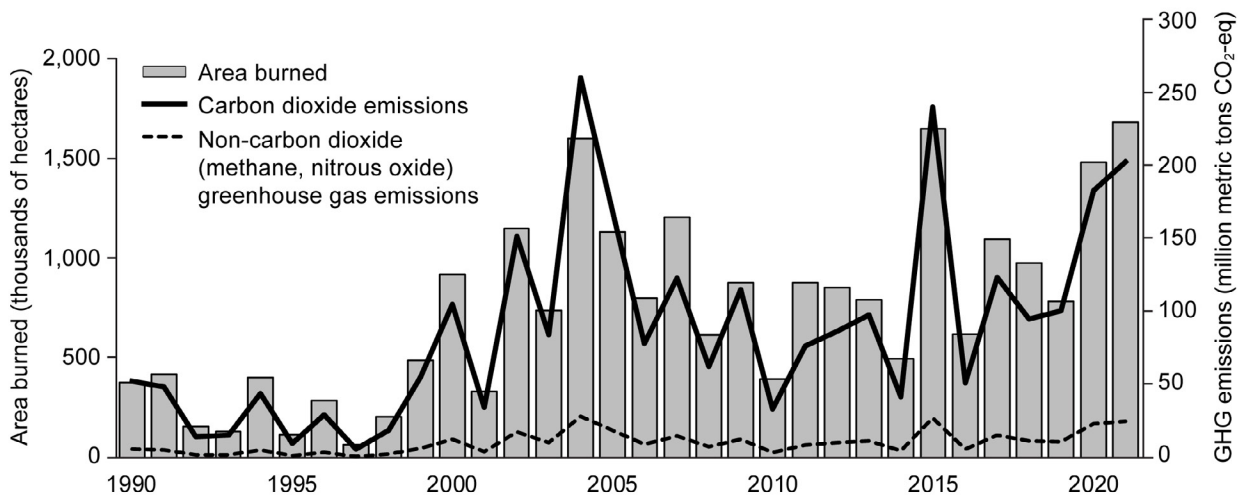
La persistencia de la cobertura arbórea en Estados Unidos varía debido a muchas fuerzas determinantes.

**Figura 7.1.** Esta figura muestra el número de años en que cada píxel de 30 m por 30 m fue clasificado como cobertura forestal durante 1985-2020. Los recuadros (A-I) muestran que los patrones de la cobertura forestal varían considerablemente de una región a otra, a menudo debido a diferencias en los factores causantes del cambio forestal. Los patrones de cambio de la cobertura arbórea en los EE. UU. se deben, en gran parte, a las perturbaciones relacionadas con el clima, el uso de la tierra y el cambio de uso de la tierra. No se dispone de datos sobre Alaska, Hawaii y las islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. ni sobre el Caribe estadounidense. Créditos de la figura: USGS.



La vulnerabilidad de los bosques estadounidenses al cambio climático y a las perturbaciones relacionadas con el clima varía (en relación con la variabilidad natural) debido a las diferencias en las condiciones biofísicas y a las variaciones locales y regionales del clima (Capítulos 2, 3). Por ejemplo, aunque las temperaturas del siglo XXI (2001-2020) han aumentado en casi todo Estados Unidos. (en relación con 1951-1970), este calentamiento no se ha producido de manera uniforme en todo el país (KM 3.4; Figura 3.11). Debido a estas diferencias, la capacidad de algunos bosques estadounidenses para brindar servicios ecosistémicos se ve cada vez más afectada por el cambio climático y las perturbaciones relacionadas con el clima (KM 7.1, 7.2)<sup>7</sup>. Por ejemplo, la cantidad de bosque quemado y las emisiones de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) procedentes de los incendios han aumentado sustancialmente desde 1990, sobre todo en el oeste, y tres de los cinco peores años de incendios forestales (según la superficie quemada y las emisiones de GHG) se produjeron desde 2015 (Figura 7.2)<sup>3</sup>. La adaptación proactiva contribuirá al aprovechamiento de los servicios ecosistémicos de los bosques. Los ejemplos de adaptación en los bosques estadounidenses han proliferado desde 2017 (KM 7.3; Capítulo 31) en terrenos federales, estatales, locales, tribales y privados (p. ej., Moser *et al.* 2019<sup>8</sup>; Departamento de Agricultura de Estados Unidos [United States Department of Agriculture, USDA] 2022<sup>9</sup>, 2021<sup>10</sup>). Los efectos del cambio climático en los bosques de regiones específicas de los EE. UU. se analizan en varios de los capítulos regionales (p. ej., Capítulos 21-24, 27-29).

### Emisiones anuales estimadas de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) procedentes de incendios forestales y controlados



**El área forestal quemada y las emisiones de GHG asociadas han aumentado en décadas recientes en Estados Unidos.**

**Figura 7.2.** El área forestal quemada estimada y las emisiones de GHG (dióxido de carbono, metano y óxido nítrico) procedentes de incendios forestales y controlados en los EE. UU. contiguos y Alaska han aumentado desde finales de la década de los años 90 del siglo XX. El cambio climático está afectando la probabilidad y la escala de los incendios forestales en los bosques estadounidenses. En algunos casos, los incendios forestales (sobre todo en el oeste de los EE. UU.) han retrasado o detenido la recuperación de los bosques después de perturbaciones anteriores, lo que reduce su capacidad de secuestrar y almacenar carbono. Adaptado de Domke *et al.* 2023<sup>3</sup>.

## Mensaje clave 7.1

### El cambio climático y las perturbaciones afectan cada vez más los bosques

El cambio climático está aumentando la frecuencia, la escala y la severidad de algunas perturbaciones que impulsan el cambio forestal y afectan los servicios de los ecosistemas (*confianza alta*). Se espera que el calentamiento continuado y los cambios regionales en las precipitaciones amplifiquen las interacciones entre los agentes perturbadores (*probable, confianza alta*) y alteren aún más la estructura y la función de los ecosistemas forestales (*probable, confianza alta*).

El cambio climático afecta perturbaciones como los incendios forestales, los insectos, las enfermedades y los usos de la tierra, así como las interacciones entre estas perturbaciones, todo lo cual da forma a los ecosistemas forestales a través de cambios en el crecimiento, la mortalidad, la regeneración y el reclutamiento de vegetación a lo largo del espacio y del tiempo (Figura 6.1 en Vose *et al.* 2018<sup>11</sup>). Las perturbaciones alteradas por el cambio climático plantean riesgos para la salud actual y futura de los bosques (es decir, el grado en que los procesos de los ecosistemas funcionan dentro de su rango natural de variación histórica), y afectarán a las condiciones de los bosques en todos los paisajes durante años o siglos. Los eventos meteorológicos como sequías, huracanes, vendavales e inundaciones pueden exacerbar los efectos de las perturbaciones, especialmente en casos extremos (Figura 7.3; Capítulos 8, 9). La exposición y la sensibilidad de los bosques al cambio climático y a las perturbaciones relacionadas con el clima varían según las perturbaciones, el estado de los bosques, el historial de gestión y la tasa y la magnitud del cambio.

## Bosque fantasma costero



**Los bosques fantasma costeros son el resultado de la muerte de los árboles por el aumento del nivel del mar y la intrusión de agua salada.**

**Figura 7.3.** La foto muestra un bosque fantasma costero (primer plano) cerca del Refugio Nacional de Vida Silvestre de Blackwater, Maryland. A medida que sube el nivel del mar en respuesta al cambio climático, la sustitución de los bosques costeros por humedales de marea afectará muchos servicios ecosistémicos, incluida la capacidad de amortiguación de las marejadas ciclónicas. Créditos de la fotografía: ©Matthew L. Kirwan, Virginia Institute of Marine Science.

El cambio climático está afectando la probabilidad y la escala de los incendios forestales en los bosques estadounidenses. Por ejemplo, la cantidad de bosque quemado por incendios forestales en el Oeste ha aumentado en relación con mediados y finales del siglo XX<sup>12,13</sup> debido, en parte, a que el calentamiento aumenta los déficits de presión de vapor y las tasas de evapotranspiración (KM 4.1)<sup>12,14</sup>, así como a la disminución de las precipitaciones (KM 4.1)<sup>15</sup>. Se proyecta que la actividad incendiaria aumente con el calentamiento y la reducción de las precipitaciones<sup>14,16</sup>, aunque los aumentos dependen de los tipos de combustible regionales y pueden llegar a disminuir en algunos bosques debido a la reducción de la carga de combustible<sup>17</sup>. El área quemada por incendios forestales de alta severidad (p. ej., incendios que destruyen masas forestales) se ha octuplicado en el Oeste desde 1985<sup>18</sup>, en parte debido a condiciones más cálidas y secas (Figura 7.4; KM 2.1). Allí donde se dispone de combustibles abundantes, los bosques del oeste de los EE. UU. han experimentado un aumento de la proporción de área quemada con alta severidad, especialmente en el Suroeste (KM 28.5)<sup>18</sup>. Se espera que el aumento de la severidad de los incendios se generalice en los bosques estadounidenses en el futuro<sup>19</sup>. Se espera que los incendios atípicos y los niveles de inflamabilidad del combustible que históricamente eran esporádicos se vuelvan más comunes (enfoque en los incendios forestales del occidente).

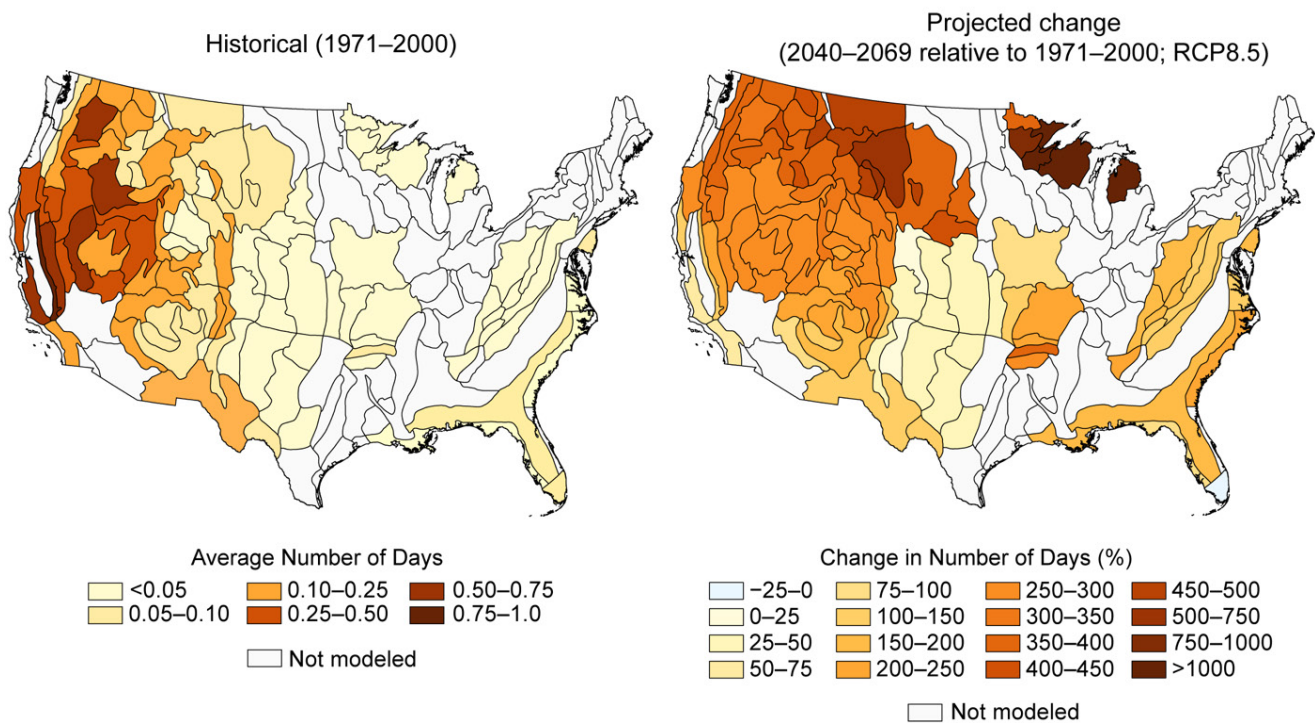
Determinar los efectos del cambio climático en los incendios forestales es más difícil en regiones fuera del Oeste, por ejemplo, en zonas donde el uso de incendios controlados ha cambiado sustancialmente con el tiempo (Sureste), donde los incendios forestales eran históricamente poco frecuentes (Noreste) y donde los



bosques representan una pequeña parte del paisaje (regiones agrícolas del centro de los EE. UU.). Además, la intensidad del fuego (energía liberada durante el incendio forestal) y la severidad dependen de la disponibilidad de combustible y de la inflamabilidad, que se ven directamente afectadas por la gestión (incluida la extinción de incendios forestales) y el uso de la tierra<sup>20</sup>, así como los cambios climáticos. Sin embargo, las condiciones meteorológicas alteradas (p. ej., la humedad relativa y la velocidad del viento), especialmente las condiciones extremas que favorecen la propagación de incendios forestales, se han hecho más frecuentes en las décadas recientes<sup>21</sup> y se atribuyen, en parte, al cambio climático (KM 2.2)<sup>22</sup>. Cambios en la demografía humana en la WUI y el aumento de la proporción de incendios provocados por la actividad humana frente a incendios naturales<sup>23</sup> se han combinado con el cambio climático para alterar las expectativas históricas de iniciación y propagación de incendios. Un estudio descubrió que una tendencia a largo plazo en el déficit nocturno de presión de vapor, no simulada en los modelos climáticos, explicaba las recientes observaciones de los gestores de incendios de que las tasas de propagación de los incendios en el Oeste se retrasaban menos por la noche<sup>24</sup>.

### Incendios muy grandes

May–October extreme weather conditions associated with very large fires



#### Se proyecta un aumento de las condiciones propicias para incendios de gran magnitud.

**Figura 7.4.** El panel de la izquierda muestra los valores históricos (1971-2000) del número anual de días de mayo a octubre con condiciones climáticas extremas propicias para incendios muy grandes (Very Large Fires, VLF; más de 12,000 acres). El panel derecho muestra el cambio porcentual en el número de días para un clima futuro proyectado (2040-2069) en un escenario muy alto (RCP8.5). Los cambios se resumen por ecosecciones de Bailey, que son áreas de vegetación y clima similares definidas por Bailey (2016)<sup>25</sup>. El número de días con condiciones asociadas a VLF se duplica con creces en muchas ecosecciones, con un aumento de más de cuatro veces para las partes del Noroeste, cinco veces para el norte de las Montañas Rocosas y más de siete veces para el alto Medio Oeste. Las condiciones proyectadas son el promedio de un conjunto de 17 modelos climáticos globales (Global Climate Model, GCM) seleccionados según la disponibilidad de datos. Las zonas sin color indican falta de datos (no se dispone de datos suficientes o los incendios forestales han sido históricamente poco frecuentes). No se dispone de datos sobre Alaska, Hawaii y las islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. ni sobre el Caribe estadounidense. Créditos de la figura: USGS.

Además de los incendios forestales, los insectos nativos e invasores (no nativos), las enfermedades y las plantas son importantes perturbaciones forestales en cuya extensión y efectos influyen factores climáticos y no climáticos. La mortalidad de los árboles por escarabajos de la corteza en Occidente ha aumentado a finales del siglo XX y principios del XXI debido, en parte, al cambio climático (Recuadro 7.1)<sup>26,27,28,29</sup>. Los efectos del cambio climático sobre otros insectos y enfermedades forestales son menos claros. Por ejemplo, la roya ampollosa del pino blanco (una enfermedad causada por el hongo no nativo *Cronartium ribicola*) disminuirá donde las condiciones sean más cálidas y secas (Suroeste), pero aumentará donde las condiciones sean más cálidas y húmedas (bosques subalpinos de gran altitud)<sup>30</sup>. El calentamiento, la alteración de los patrones de precipitaciones, los eventos extremos y las perturbaciones influyen en las trayectorias de invasión y pueden facilitar el establecimiento y la propagación de especies invasoras (KM 8.2)<sup>31</sup>. En Hawaii, el cambio climático y la propagación de gramíneas invasoras han aumentado la frecuencia y la extensión de los incendios forestales<sup>32</sup>. En el Sureste, el aumento de las temperaturas ha permitido que especies invasoras sensibles al frío, como el kudzu, se desplacen hacia el norte<sup>33</sup>, lo que afecta la estructura y la composición de los bosques. El kudzu y otras enredaderas leñosas se ven estimuladas por el aumento del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)<sup>34</sup>, y en algunos casos superan a los árboles y otras plantas<sup>35</sup>. Incluso en ausencia de otras perturbaciones, el calentamiento y la sequía son importantes causas de mortalidad arbórea en los EE. UU. y en el resto del mundo<sup>36</sup>.

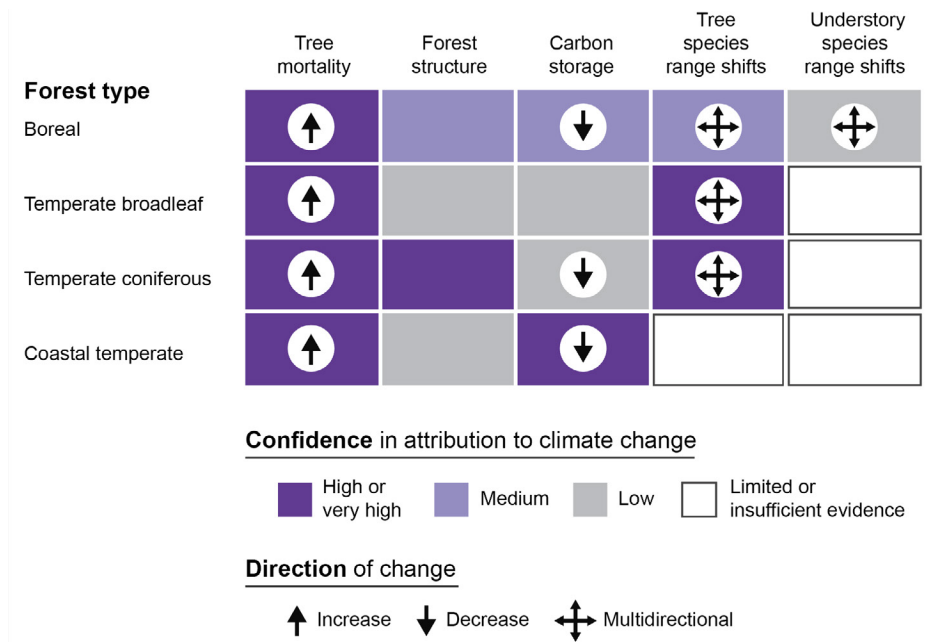
El aumento del nivel del mar, otra perturbación relacionada con el clima, afecta la distribución, la estructura y la composición de los bosques (KM 9.2). La intrusión de agua salada ha reducido la salud, la diversidad y la productividad de algunos bosques costeros del Este (Figura 7.3)<sup>37</sup>. Se proyecta que el nivel del mar provoque la pérdida de los manglares existentes en muchos lugares en las próximas décadas<sup>38,39,40</sup>. Sin embargo, el calentamiento durante el invierno ha facilitado la migración hacia el norte de los manglares del Sureste (Figura 7.7)<sup>41</sup>.

La estructura, función y diversidad de los bosques se ven afectadas en una amplia gama de escalas espaciales (Figura 7.5). La variación de las condiciones ambientales, las perturbaciones históricas y contemporáneas, el historial de gestión y el uso de la tierra han modificado muchos bosques, haciéndolos más vulnerables a sequías, incendios forestales y otras perturbaciones<sup>42</sup>. Estas perturbaciones aceleran la mortalidad de los árboles, alteran la distribución de los árboles y otras especies vegetales, las distribuciones por edad y tamaño y el éxito de la regeneración, y pueden llevar a la conversión a ecosistemas no forestales (p. ej., Falk *et al.* 2022<sup>43</sup>; Stanke *et al.* 2021<sup>44</sup>).

Se están produciendo transformaciones ecológicas y cambios en los hábitats forestales debido al cambio climático (KM 8.1)<sup>45</sup>. En algunos bosques de baja altitud del Oeste, la regeneración de los árboles en los últimos 20 años se ha visto limitada por un clima desfavorable. La elevada severidad de los incendios forestales y la escasa disponibilidad de semillas han reducido aún más la regeneración después del incendio en algunos lugares<sup>46,47</sup>. La migración de especies arbóreas orientales está asociada a una mayor producción de semillas, pero está limitada en cierta medida por la presencia y distribución de grandes zonas urbanas en el Este.



## Efectos del cambio climático en los bosques



### El cambio climático y las perturbaciones relacionadas con él están afectando los bosques de Estados Unidos.

**Figura 7.5.** La figura muestra los efectos recientemente documentados, específicos de cada tipo de bosque, que se han atribuido al cambio climático y a las perturbaciones relacionadas con el clima. Los efectos incluyen un aumento de la mortalidad de los árboles en todos los tipos con un nivel de confianza alto, cambios en la estructura forestal con un nivel de confianza variable, menor almacenamiento de carbono en tres de los cuatro tipos de bosque y cambios variables en la composición de las especies vegetales. Los niveles de confianza reflejan la incertidumbre en las atribuciones basadas en la literatura disponible. Las flechas indican la dirección del cambio cuando existen datos adecuados. En el caso de los bosques templados, la estructura está cambiando, pero no de forma unidireccional. El bosque boreal refleja cambios solo en Alaska. Las evaluaciones de la figura se basan en literatura reciente pertinente, y las citas pueden encontrarse en los metadatos. Adaptado con permiso de la Figura SPM.2 del IPCC 2022<sup>48</sup>.

Aunque los efectos del cambio climático sobre las especies arbóreas han sido bien estudiados, los efectos sobre las plantas del sotobosque son poco conocidos<sup>49</sup>. En Wisconsin, los cambios en las especies de plantas del sotobosque van a la zaga de los cambios climáticos regionales, pero no tanto en el caso de las especies con mayor ocupación del suelo y mayores masas de semillas<sup>50</sup>. En las montañas Siskiyou de Oregón, el aumento promedio de la temperatura de unos 3.6 °F desde 1948 ha tenido efectos diversos en las comunidades vegetales. Las comunidades herbáceas de baja altitud son ahora coherentes con un clima más cálido y seco y se asemejan a las comunidades vegetales de posiciones topográficas más meridionales. A mayor altitud, han aumentado las hierbas de afinidad biogeográfica septentrional<sup>51</sup>.

Algunas actividades de gestión y cambios en el uso de la tierra, especialmente la rápida expansión de la WUI,<sup>5</sup> han reducido la capacidad de adaptación de los bosques a las variaciones climáticas y a las perturbaciones relacionadas con el clima<sup>52,53,54</sup>. La WUI es más frecuente en el Este, pero se está expandiendo a una tasa más rápido en el Oeste<sup>5</sup>. En el Este, los bosques de la WUI conservan árboles más grandes y biomasa sobre el suelo que los bosques menos desarrollados, pero con menos diversidad estructural (es decir, los bosques de la WUI tienen menos árboles jóvenes, plántulas y árboles muertos). Esto suscita preocupación por la disminución de la función ecológica, la reducción de la diversidad del hábitat de la vida silvestre y la vulnerabilidad al calentamiento<sup>55</sup>. En el Oeste, la exclusión de los incendios forestales en bosques secos históricamente adaptados a incendios frecuentes ha alterado la estructura y composición de los bosques, lo que ocasiona una mayor carga de combustible en la superficie y en el dosel y aumentando la vulnerabilidad a los incendios forestales de alta severidad<sup>56,57</sup>.

## Recuadro 7.1. Escarabajos de la corteza y cambio climático

Los escarabajos de la corteza pasan la mayor parte de su vida dentro de un árbol huésped, alimentándose y reproduciéndose bajo la corteza. El cambio climático ha aumentado el impacto de algunos escarabajos de la corteza debido a 1) el calentamiento, que en algunos casos ha aumentado los ciclos de vida y disminuido la mortalidad invernal de los escarabajos dentro del árbol huésped; y 2) la sequía, ya que los árboles huéspedes con estrés por sequía tienen las defensas comprometidas y ofrecen poca resistencia a la colonización por escarabajos de la corteza<sup>26,27,58</sup>. El calentamiento durante el verano aumenta la probabilidad de que un escarabajo del abeto complete su ciclo vital en un año en comparación con dos años<sup>59</sup>, lo que ha incrementado las poblaciones de escarabajos del abeto en algunas zonas (Figura 7.6). En California, el calentamiento y la sequía provocaron la mortalidad de más de 100 millones de árboles entre 2014 y 2017, la mayoría atribuida a los escarabajos del pino occidentales (Figura 7.6) que colonizaron los pinos ponderosa<sup>60,61</sup>. Alrededor del 30 % de la mortalidad de árboles en California se atribuyó a que el calentamiento aceleró el ciclo de vida del escarabajo occidental del pino, mientras que el resto se atribuyó al aumento de la susceptibilidad del árbol huésped debido al estrés por sequía<sup>29</sup>. Es posible que la biomasa de pinos ponderosa en California no vuelva a los niveles anteriores a la sequía debido a futuros calentamientos, sequías y brotes del escarabajo occidental del pino<sup>62</sup>.

El calentamiento ha permitido que los escarabajos del pino de montaña aparezcan en elevaciones y latitudes en las que históricamente los inviernos eran lo suficientemente fríos como para matar la mayoría de las crías de escarabajos del pino de montaña dentro del árbol huésped<sup>26</sup>. En Nueva York y Nueva Inglaterra, una reciente expansión climática del área de distribución del escarabajo del pino del sur ha generado una nueva interacción escarabajo de la corteza-árbol huésped en los bosques de pino bronco<sup>63</sup>. En Alaska, un brote en curso del escarabajos del abeto ha afectado más de 1.6 millones de acres desde 2016 y se ha expandido a la cordillera de Alaska<sup>27</sup>, lo que amenaza los bosques de abetos en el interior de Alaska, donde las poblaciones del escarabajos del abeto fueron reguladas históricamente por las bajas temperaturas invernales<sup>64</sup>.

Los brotes de escarabajos de la corteza suelen ser perjudiciales para la prestación de servicios ecosistémicos<sup>65</sup> y pueden afectar otras perturbaciones y sus efectos sobre los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, en algunos bosques, los brotes del escarabajo del pino de montaña han aumentado la severidad de los incendios<sup>66</sup> y la abundancia de malezas invasoras<sup>67</sup>. Las intervenciones silvícolas, como los claros para reducir la densidad de árboles, pueden utilizarse para aumentar la resistencia y resiliencia de algunos bosques frente a los escarabajos de la corteza (KM 7.3), una relación atribuida a la disminución de la competencia entre árboles y al aumento asociado del vigor de los árboles, entre otros factores<sup>27</sup>.

### Brotos del escarabajo del abeto y el pino



**Los brotes de escarabajos del abeto y del pino, atribuibles en parte al cambio climático, están acabando con los árboles del Oeste.**

**Figura 7.6.** Estas fotos muestran un brote de escarabajo del abeto en el Bosque Nacional Bridger-Teton de Wyoming (**izquierda**) y un brote del escarabajo del pino occidental en el Bosque Nacional de la Sierra en California (**derecha**). Los árboles descoloridos fueron colonizados y destruidos por escarabajos de la corteza. El calentamiento y la sequía han aumentado el impacto de algunos escarabajos de la corteza en los bosques estadounidenses, lo que ha afectado muchos servicios de los ecosistemas. Créditos de la fotografía: Christopher J. Fettig, USDA Forest Service.



## Mensaje clave 7.2

### El cambio climático afecta los servicios ecosistémicos que los bosques aportan

El cambio climático amenaza los servicios ecosistémicos que los bosques aportan y que enriquecen la vida humana y sustentan la vida en general. El aumento de las temperaturas, el cambio de los patrones de precipitación y la alteración de las perturbaciones están afectando la capacidad de los ecosistemas forestales para secuestrar y almacenar carbono (*confianza alta*), suministrar agua y aire limpios (*confianza alta*), producir madera y productos no madereros (*confianza alta*) y ofrecer actividades recreativas (*confianza media*), entre otros beneficios. Los efectos climáticos futuros interactuarán con los cambios sociales para determinar la capacidad de los bosques de suministrar servicios ecosistémicos (*probable, confianza alta*).

Algunos efectos del cambio climático y de las perturbaciones relacionadas con el clima sobre los servicios de los ecosistemas y sus beneficios económicos asociados son graduales, impulsados por el calentamiento anual o estacional, la alteración de los patrones de precipitaciones o el aumento del nivel del mar. Otros son más rápidos, impulsados por eventos extremos como sequías, huracanes u olas de calor. La coocurrencia o las interacciones entre perturbaciones (perturbaciones compuestas) pueden amplificar los efectos de las perturbaciones individuales sobre los servicios de los ecosistemas (Recuadro 7.1; Figura 7.7; KM 2.3)<sup>68,69</sup>.

Se proyecta que el cambio climático afecte el crecimiento forestal a nivel nacional e internacional, los mercados de la madera y el papel (p. ej., Tian *et al.* 2016<sup>70</sup>) y la cantidad de carbono almacenado en los productos de madera recolectada (Recuadro 7.2; KM 12.2; p. ej., Johnston y Radeloff 2019<sup>71</sup>). Sin embargo, la fuerza de estos efectos es incierta debido a las perturbaciones, como sequías, incendios forestales, insectos y enfermedades, que limitan el crecimiento de los bosques<sup>72</sup>. Las medidas de gestión forestal adoptadas en respuesta al cambio climático también pueden afectar la producción de productos madereros, el carbono y los servicios ecosistémicos asociados (p. ej., Creutzburg *et al.* 2017<sup>73</sup>). El aumento del nivel del mar también afecta directa e indirectamente la producción maderera y el almacenamiento de carbono a través de la pérdida de bosques costeros por la intrusión de agua salada y las pérdidas y reconstrucción de viviendas, con una proyección de 800,000 nuevas unidades residenciales necesarias en los EE. UU. para 2050 para acomodar las reubicaciones debido al aumento del nivel del mar en un escenario muy alto (RCP8.5)<sup>74</sup>.

El cambio climático está alterando las áreas de distribución y la abundancia de algunas plantas y hongos utilizados para la alimentación, la medicina y otros propósitos. La reducción de la profundidad de la nieve, por ejemplo, puede aumentar las lesiones y la mortalidad de las plantas debido a la mayor exposición de los tejidos a las heladas<sup>75,76,77</sup>, así como a la reducción de la biomasa y la actividad microbianas<sup>78,79</sup>. Muchas plantas y hongos tienen requisitos ecológicos precisos y áreas de distribución geográfica reducidas, lo que los hace vulnerables al cambio climático<sup>80</sup>. Algunas especies se encuentran en el límite de su área de distribución, incapaces de adaptarse a unas condiciones que cambian rápidamente<sup>81</sup>. Los efectos difieren según las especies de plantas y hongos, en relación con su sensibilidad y capacidad de adaptación.

El cambio climático afecta los valores patrimoniales, la identidad cultural y las conexiones espirituales asociadas a los bosques, agravando las injusticias medioambientales que afectan la soberanía alimentaria, la salud, las prácticas culturales y la transmisión de conocimientos de los pueblos indígenas y tribales (Capítulos 16, 20)<sup>82</sup>. Ejemplos de especies culturalmente significativas afectadas por el cambio climático son el salmón, la trucha de arroyo, los robles, el pino piñonero y el pino de corteza blanca (Recuadro 7.3)<sup>83,84,85,86,87</sup>. En 2023, el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los EE. UU. incluyó al pino de corteza blanca en la lista de

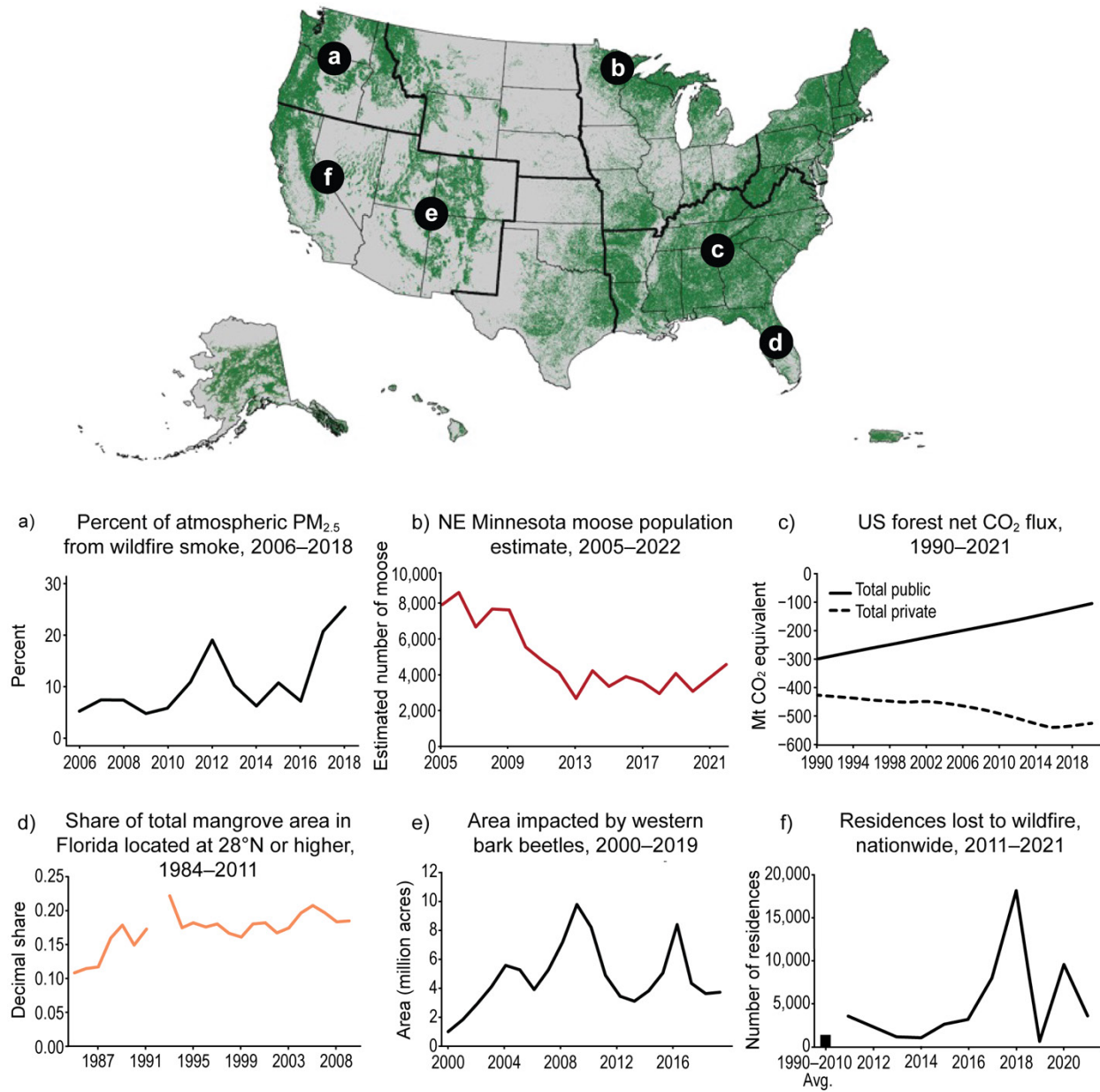
especies amenazadas, identificando la roya blíster del pino blanco, el escarabajo del pino de montaña, la alteración de los patrones de incendios forestales y el cambio climático como las principales amenazas para su existencia<sup>88</sup>. Los cambios relacionados con el clima ponen de relieve la fluctuación de la constancia, la sincronización y la disponibilidad de alimentos, fibras y medicinas de importancia cultural<sup>89,90,91</sup>.

El cambio climático reduce algunas actividades recreativas basadas en los bosques y aumenta otras. Por ejemplo, el calentamiento y la reducción de la capa de nieve han tenido efectos negativos en los deportes de invierno (p. ej., esquí de fondo, raquetas de nieve y motos de nieve) y positivos en las actividades de condiciones meteorológicas cálidas, con efectos mixtos en las actividades acuáticas<sup>92</sup>. Se proyecta que la participación en la pesca y las actividades acuáticas motorizadas aumente en el Norte, mientras que las actividades acuáticas motorizadas disminuirán en algunas partes del Oeste<sup>93</sup>.

El aumento de la superficie forestal quemada por los incendios forestales está provocando efectos negativos en la salud humana y crecientes pérdidas económicas<sup>94</sup>. El aumento del humo de los incendios forestales está incrementando las hospitalizaciones asociadas a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (KM 14.2; enfoque en los incendios forestales del occidente)<sup>95</sup> y los casos fuera de hospitales de infarto de miocardio<sup>96</sup>. Las sustancias químicas movilizadas en el medio ambiente por las estructuras e infraestructuras incendiadas pueden diferir de las emitidas por la quema de combustibles forestales, lo que aumenta potencialmente los problemas de salud humana (KM 14.2)<sup>97,98</sup>.



Servicios de los ecosistemas forestales



**El cambio climático ha afectado a la provisión de bienes y servicios de los ecosistemas forestales en Estados Unidos.**

**Figura 7.7.** (a) El aumento de los contaminantes atmosféricos en forma de partículas finas (Particulate Matter, PM<sub>2.5</sub>) causados por los incendios forestales degradan la calidad del aire y aumentan los riesgos para la salud humana (no se dispone de datos de Alaska, Hawaii, Puerto Rico, Islas Vírgenes de los EE. UU. e Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU.). (b) La reducción de las oportunidades de caza del alce se debe al aumento de parásitos relacionados con el clima; también se ha observado una disminución de las oportunidades de caza en el oeste de los EE. UU.<sup>99</sup>. (c) El aumento de la mortalidad de los árboles está reduciendo el secuestro de carbono en los bosques públicos (Mt son millones de toneladas métricas). (d) La migración de los manglares hacia el norte está desplazando a las marismas de agua salada, alterando la protección costera contra las tormentas y afectando las actividades recreativas (no se dispone de datos de 1992). (e) El aumento de la mortalidad de los árboles por los escarabajos de la corteza disminuye el valor de las viviendas debido a la reducción de los servicios medioambientales<sup>100</sup>. (f) Las pérdidas de viviendas debido a incendios forestales se quintuplicaron en la década de los años 10 del siglo XXI en comparación con el promedio de 1990 a 2010, con una importante variabilidad interanual; los datos excluyen pérdidas de las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. Notas: El mapa excluye la representación

del área forestal de las Islas Vírgenes de los EE. UU. y las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. debido a la gran escala del mapa. El área forestal de las Islas Vírgenes de los EE. UU. es de 46,967 acres<sup>101</sup>. Las superficies forestales de las islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. son las siguientes: Estados Federados de Micronesia (143,466 acres), Islas Marshall (23,252 acres), Islas Marianas del Norte (75,407 acres), Palaos (90,685 acres), Samoa Americana (43,631 acres) y Guam (63,833 acres); los datos resumidos de las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. proceden de fuentes citadas en Lugo *et al.* 2022<sup>102</sup>. Créditos de las figuras: (arriba) USDA Forest Service; (a) adaptado con permiso de Burke *et al.* 2021<sup>103</sup>; (b) USDA Forest Service; (c) adaptado de Domke *et al.* 2023<sup>3</sup>; (d) USDA Forest Service; (e) adaptado de Fettig *et al.* 2022<sup>27</sup>; (f) USDA Forest Service.

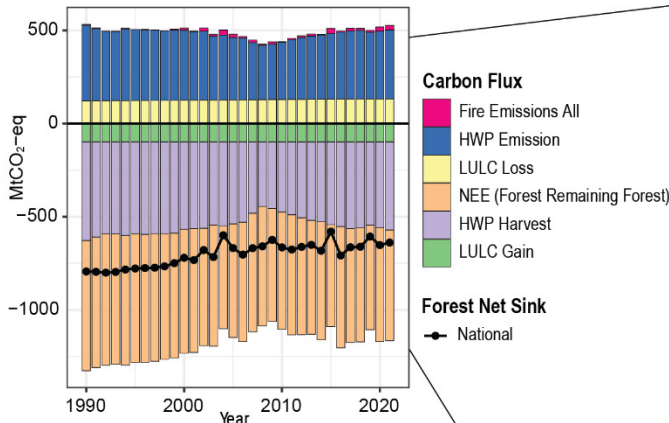
Los eventos extremos se han relacionado con el declive de las poblaciones de anfibios, aves, peces, invertebrados, mamíferos, plantas y reptiles (KM 8.2)<sup>104</sup>. Los recientes descensos de las poblaciones de insectos se han atribuido, en parte, al cambio climático, con consecuencias de gran alcance<sup>105,106</sup>. El cambio climático está aumentando la intensidad de los huracanes en el Este y sus precipitaciones asociadas<sup>107,108</sup>, aunque los cambios proyectados en la frecuencia de los huracanes debido al calentamiento son inciertos (Capítulos 2, 3; p. ej., Sobel *et al.* 2021<sup>109</sup>). El aumento de la intensidad de los huracanes podría afectar la estructura y la función de los bosques y el hábitat de la vida silvestre (p. ej., Brown *et al.* 2011<sup>10</sup>). Las especies móviles o capaces de crecer rápidamente (p. ej., las invasoras) suelen beneficiarse de eventos extremos y perturbaciones bruscas<sup>104</sup>.

### Recuadro 7.2. Bosques y carbono

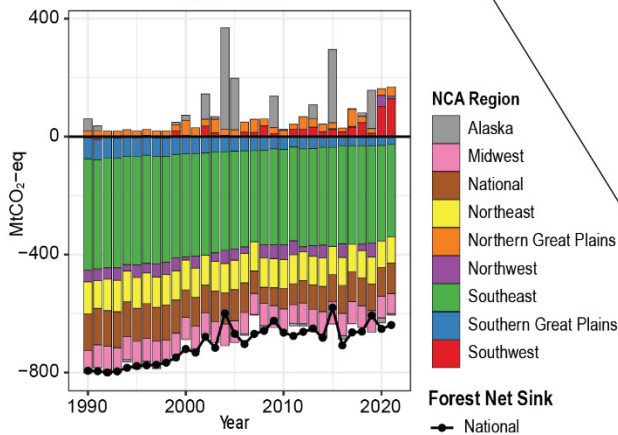
El carbono circula continuamente entre la Tierra y la atmósfera. Los bosques ayudan a regular el clima, ya que las plantas vivas eliminan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera mediante la fotosíntesis, lo que facilita su mantenimiento y crecimiento, y liberan parte de ese carbono mediante la respiración. Los ecosistemas forestales son el mayor sumidero terrestre de carbono de la Tierra.<sup>111</sup> En los EE. UU., la cantidad de carbono almacenada en los bosques (principalmente en suelos y árboles), así como en los productos de madera recolectada que están en uso (p. ej., papel y madera contrachapada) o en sitios de residuos sólidos (p. ej., vertederos), equivale a casi tres décadas de emisiones de combustibles fósiles. En promedio, entre 2017 y 2021, la captación de carbono de los ecosistemas forestales ha compensado el equivalente a más del 13 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> de toda la economía cada año<sup>3</sup>. En décadas recientes, la tasa de secuestro de carbono forestal ha disminuido lentamente, en parte debido a la creciente frecuencia y severidad de las perturbaciones relacionadas con el clima, lo que ha provocado una variabilidad interanual en el sumidero de carbono forestal y transferencias abruptas (p. ej., incendios forestales) o graduales (p. ej., brotes de insectos) de carbono a la atmósfera, a los depósitos de materia orgánica muerta (madera muerta, hojarasca) y a los suelos (Figura 7.8; KM 6.1)<sup>112,113</sup>. En algunos casos, las perturbaciones relacionadas con el clima han retrasado o detenido la recuperación de los bosques, reduciendo su capacidad para almacenar carbono (Figura 7.8b)<sup>62,114,115,116</sup>, y se proyecta que estas tendencias continúen en múltiples escenarios climáticos, de uso de la tierra y socioeconómicos. Las actividades humanas como la gestión forestal (p. ej., la tala de madera, los incendios controlados y otras intervenciones silvícolas) también son importantes impulsores de la dinámica del carbono de los ecosistemas forestales. La tala, por ejemplo, provoca la transferencia de parte del carbono almacenado en los árboles vivos y muertos a la atmósfera, así como a los productos de madera talada, y puede alterar la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar nuevo carbono<sup>112,117</sup>. Los cambios en el uso de la tierra, como la expansión de las tierras de cultivo y la urbanización, también han contribuido a la disminución del secuestro o almacenamiento de carbono<sup>115,118</sup>. Sin embargo, la gestión de los ecosistemas forestales, incluidos los suelos forestales,<sup>119</sup> con fines de secuestro o almacenamiento de carbono, junto con muchos otros servicios ecosistémicos, sigue siendo una estrategia de costo-efectividad relativa para mitigar el cambio climático (KM 6.3; Capítulo 32)<sup>112,120,121,122</sup>.

### Sumidero forestal de carbono

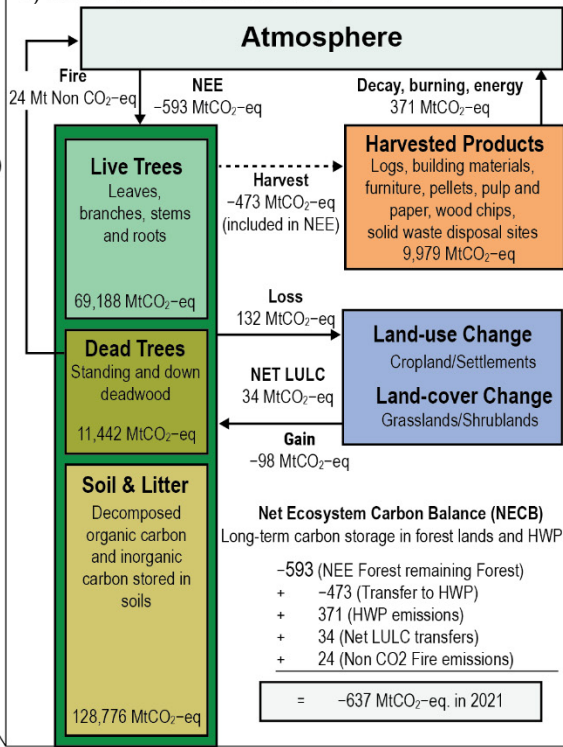
a) Forest Carbon Sources and Sinks, 1990–2021



b) Forest Carbon Sink Variability by Region, 1990–2021



c) Total Forest Carbon Stocks



Carbon stocks are values estimated for 2021. NEE (Net Ecosystem Exchange) is the net flux for forest remaining forest, which also includes harvest removals and CO<sub>2</sub> emissions from fire. Mt is millions of metric tons. HWP is harvested wood products. LULC is land-use and land-cover change.

**El sumidero forestal de carbono ha disminuido en las últimas décadas en Estados Unidos, con una importante variabilidad interanual.**

**Figura 7.8.** La figura muestra (a) la variabilidad interanual de fuentes y sumideros de carbono forestal durante el período 1990-2021; (b) la variabilidad interanual del sumidero de carbono forestal en los EE. UU. por región de la Evaluación Nacional del Clima durante 1990-2021; y (c) las reservas totales de carbono forestal por ecosistema (recuadros) y las transferencias promedio anuales entre la atmósfera y los ecosistemas forestales, los productos de madera talada y las conversiones de tierras (flechas) en 2021. Las estimaciones negativas indican una absorción neta de carbono (es decir, una eliminación neta de carbono de la atmósfera o una transferencia entre reservas de ecosistemas o categorías de tierras). Los ecosistemas forestales son el mayor sumidero de carbono de los EE. UU. Existe una importante variabilidad interanual en las emisiones y eliminaciones de GHG de las tierras forestales, que se debe, en gran parte, a las perturbaciones relacionadas con el clima, al uso de la tierra y al cambio de uso de la tierra. Créditos de la figura: USDA Forest Service y USGS.



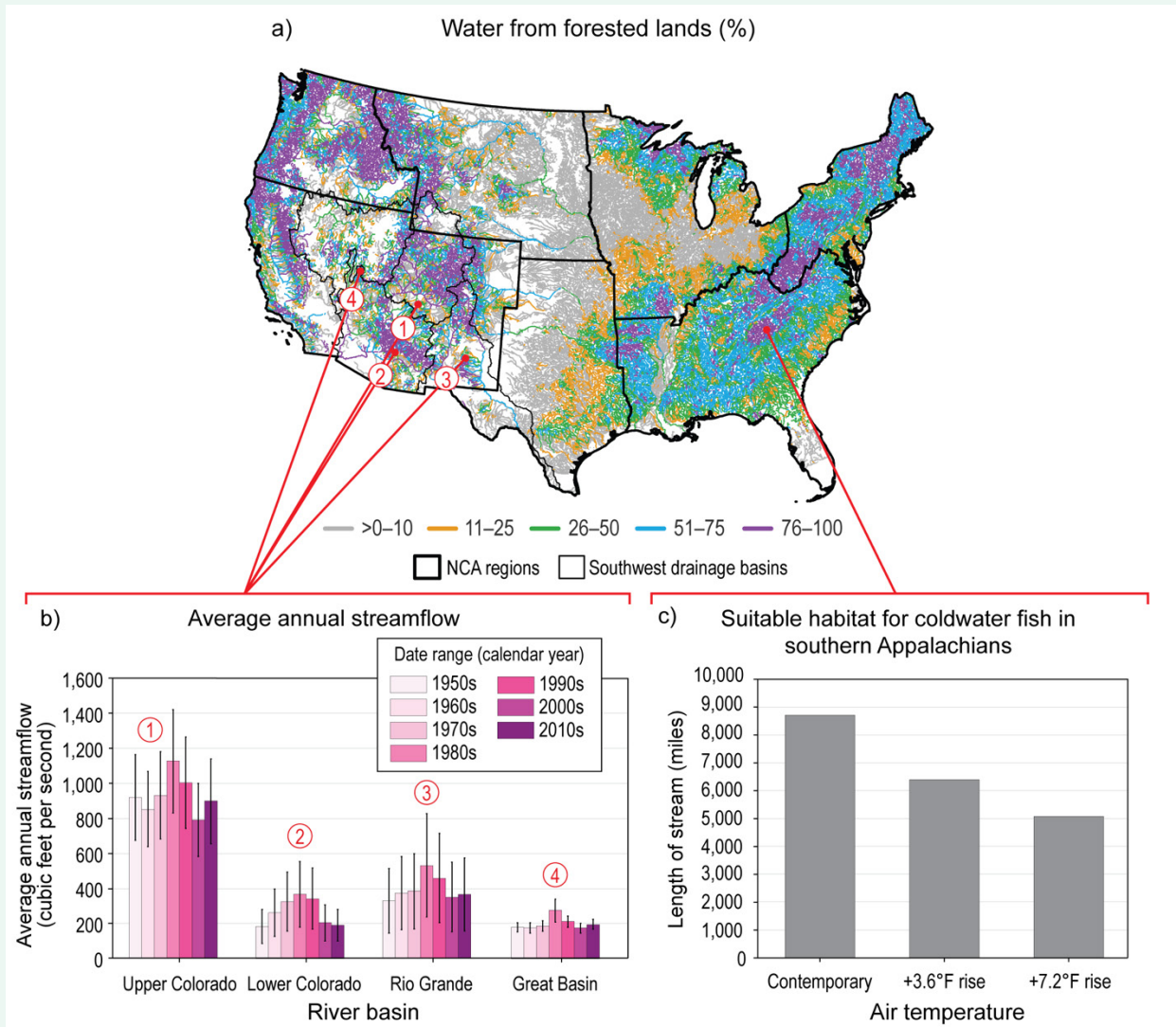
## Recuadro 7.3 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos forestales

Los bosques son una fuente fundamental de agua en los EE. UU. (Figura 7.9a)<sup>123,124</sup>, y el cambio climático y las perturbaciones relacionadas con el clima están afectando directa e indirectamente la disponibilidad y calidad del agua procedente de los bosques. El calentamiento en todo el Oeste ha provocado una reducción del manto de nieve y un deshielo y escorrentía primaverales más tempranos, lo que disminuye la disponibilidad de agua río abajo (KM 4.1)<sup>125</sup>. En el Suroeste, el aumento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones han disminuido el caudal de los arroyos en décadas recientes (Figura 7.9b)<sup>126</sup>. Los cambios en las precipitaciones y la disminución de las acumulaciones de nieve están reduciendo la magnitud o la frecuencia de las inundaciones en algunas zonas, pero aumentándolas en otras (Figura A4.8)<sup>127,128</sup>. Los modelos indican que el cambio climático afectará las inundaciones a medida que algunas cuencas pasen de precipitaciones dominadas por la nieve, o mixtas de lluvia y nieve, a precipitaciones dominadas por la lluvia<sup>129,130</sup>. Los incendios forestales y otras perturbaciones (p. ej., los brotes de escarabajos de la corteza) también pueden provocar cambios en la disponibilidad y calidad del agua de los bosques<sup>131,132</sup>. Después de los incendios forestales, la mortalidad de los árboles disminuye la evapotranspiración, aumentando así la escorrentía y el suministro de agua<sup>133</sup>. Sin embargo, los incendios forestales también aumentan la escorrentía de sedimentos, metales y otras sustancias químicas a las masas de agua durante varios años o más después de un incendio<sup>134</sup>, en las cuencas quemadas se producen más infracciones de las normas de agua potable que en las no quemadas<sup>135</sup>.

Los impactos del cambio climático en la cantidad y calidad del agua afectan a su vez la vida acuática. El calentamiento, la sequía y la disminución del manto de nieve aumentan la temperatura de los arroyos<sup>136</sup>, lo que disminuye el hábitat de los peces de agua fría (Figura 7.9c)<sup>137,138,139</sup>. Se proyecta que las precipitaciones pasen de nieve a lluvia en gran parte del sur de Alaska<sup>140</sup>. Los efectos previstos incluyen cambios en la sincronización y la magnitud de los caudales, con efectos negativos sobre la producción y el hábitat del salmón<sup>141</sup>.

Las medidas de adaptación pueden reducir algunos de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Las prácticas de gestión, como la reintroducción del castor americano, han aumentado el almacenamiento de agua en algunos paisajes<sup>142</sup>, y han tenido efectos mixtos en la calidad del agua para el salmón en el Noroeste<sup>143</sup>. Aumentar al máximo las zonas de amortiguación de los bosques ribereños reduce la erosión y la sedimentación, suministra hábitat a la vida silvestre y se proyecta que retrase o reduzca el calentamiento de los arroyos gracias a la mejora de la sombra<sup>144</sup>. El clareo y la reducción del combustible superficial pueden disminuir el riesgo de incendios forestales de alta severidad en las zonas de amortiguación propensas a los incendios y en los bosques adyacentes del Oeste<sup>145,146</sup>, con el potencial de reducir la severidad de los incendios y, en consecuencia, sus efectos sobre los recursos hídricos<sup>132</sup>.

### Efectos del clima en los recursos hídricos forestales



**El cambio climático y las perturbaciones relacionadas con el clima están afectando la disponibilidad y calidad del agua de los bosques de Estados Unidos.**

**Figura 7.9** El panel (a) muestra el porcentaje de aguas superficiales que se originan en tierras forestales en los EE. UU. contiguos, lo que ilustra que los bosques son una fuente crítica de agua. El panel (b) muestra las variaciones por décadas promedio del caudal promedio anual (medido en pies cúbicos por segundo [ft<sup>3</sup>/s]) de las cuencas hidrográficas del Código de Unidad Hidrológica 8 (Hydrologic Unit Code 8, HUC8) con una cobertura forestal superior al 50 %, sin embalses por encima de los aforadores, con al menos cuatro aforadores por cuenca y con registros completos desde 1950 en la Gran Cuenca (número de aforadores del HUC8 = 6), Alto Colorado (16), Bajo Colorado (5) y Río Grande (4). En general, los datos muestran que el caudal anual ha sido comparativamente menor en los años más recientes que en décadas anteriores. El panel (c) muestra los cambios proyectados en el hábitat adecuado para peces de agua fría en el Sureste con un calentamiento de la temperatura del aire de 3.6 °F y 7.2 °F sobre la temperatura del aire contemporánea (2012). Las proyecciones indican que el hábitat adecuado para los peces de agua fría disminuirá en el futuro a medida que aumente la temperatura del aire. Créditos de las figuras: (a) Adaptado de Liu *et al.* 2022<sup>124</sup>; (b, c) USDA Forest Service.

### Mensaje clave 7.3

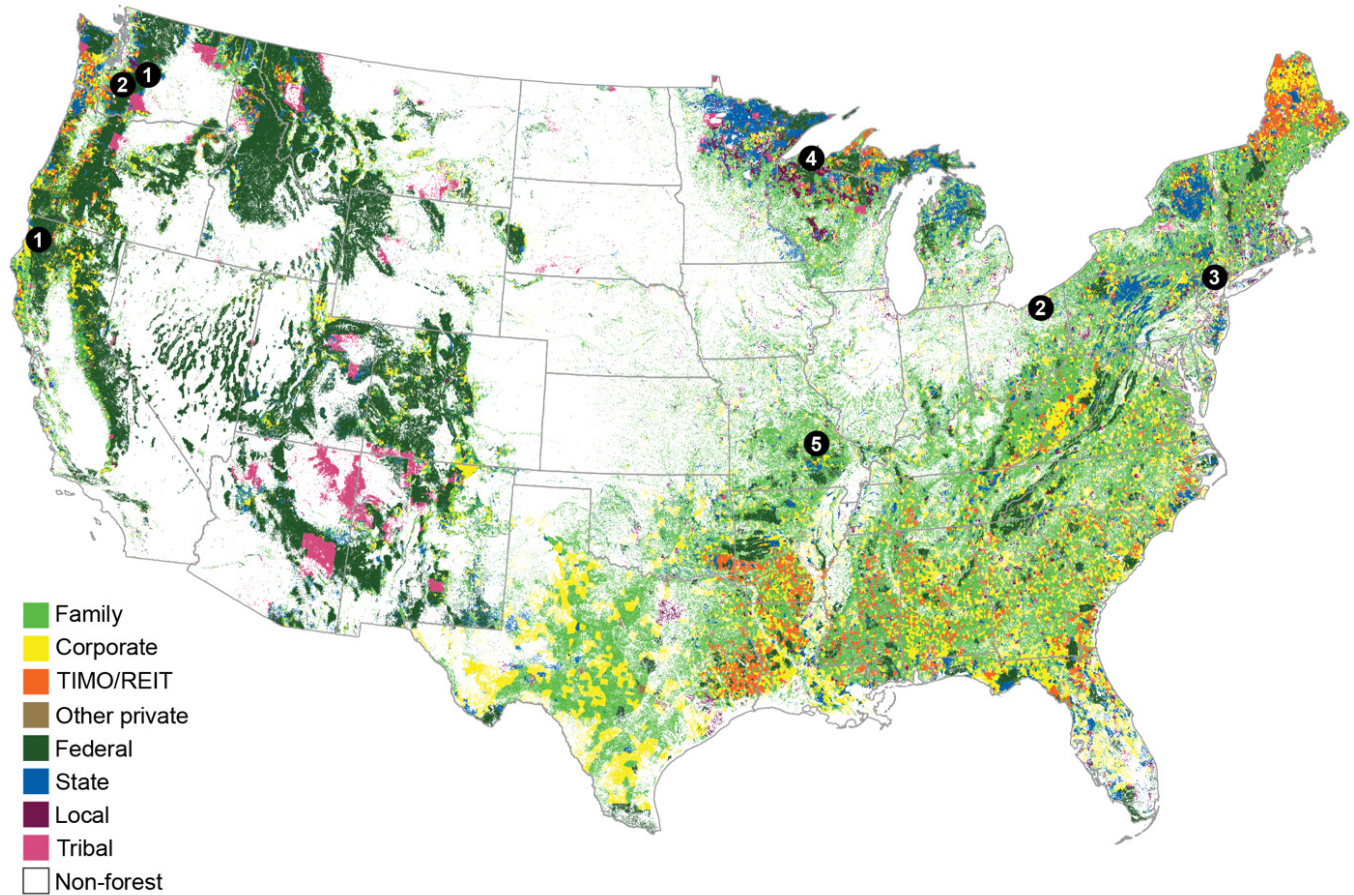
## Las medidas de adaptación son necesarias para mantener ecosistemas forestales resilientes

El cambio climático plantea retos a los gestores de recursos naturales encargados de preservar la función, la salud y la productividad de los ecosistemas forestales (*confianza alta*). Los propietarios de tierras forestales, los gestores y los responsables políticos que trabajan a niveles local, estatal, tribal y federal se están preparando para el cambio climático mediante el desarrollo y la implementación de evaluaciones de vulnerabilidad y planes de adaptación (*confianza media*). La adaptación proactiva de estrategias de gestión que creen, mantengan y restauren ecosistemas forestales resilientes es fundamental para mantener la provisión equitativa de servicios ecosistémicos (*confianza media*).

La adaptación proactiva de la gestión forestal puede ayudar a mantener el suministro continuo de servicios ecosistémicos de los bosques (p. ej., Peterson y Halofsky 2018<sup>147</sup>; Voggesser *et al.* 2013<sup>87</sup>). Desde 2017, se ha acelerado el desarrollo de evaluaciones, marcos y herramientas para orientar la adaptación en los bosques. Las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático y planes de adaptación para el ámbito de las tierras federales (p. ej., Halofsky *et al.* 2016<sup>148</sup>; Timberlake y Schultz 2019<sup>149</sup>), estatales (Figura 31.1; p. ej., Ontl *et al.* 2018<sup>150</sup>; Departamento de Protección Medioambiental de Pennsylvania [Pennsylvania Department of Environmental Protection, PADEP] 2021<sup>151</sup>), privadas<sup>152</sup> y tribales<sup>91,153</sup> han proliferado. Del mismo modo, se han introducido muchas guías y marcos para la adaptación (p. ej., Adaptation Partners 2023<sup>154</sup>; Schuurman *et al.* 2020<sup>155</sup>). Los ejemplos de implementación de prácticas de adaptación en los bosques están ahora mucho más extendidos (Figura 7.10; Tabla 7.1).



## Adaptación al cambio climático y apropiación forestal



**Las medidas de adaptación se aplican a muchos tipos de apropiación y gestión forestal en Estados Unidos.**

**Figura 7.10.** Los bosques del este de los EE. UU. son en su mayoría de propiedad privada, mientras que la mayoría de los bosques del oeste de los EE. UU. son de gestión federal. Se han llevado a cabo acciones de adaptación al cambio climático en diversos entornos de apropiación forestal. Los números del mapa corresponden a las ubicaciones de los ejemplos de adaptación enumerados en la Tabla 7.1 (el ejemplo 6 no se representa porque se centra en Puerto Rico, que no aparece en el mapa). TIMO = organización de gestión de inversiones madereras (Timber Investment Management Organization); REIT = fondo de inversión inmobiliaria (Real Estate Investment Trust). Estos datos no están disponibles para Alaska, Hawaii, el Caribe estadounidense o las islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. Adaptado de Sass *et al.* 2020<sup>156</sup>.

Tabla 7.1. Ejemplos de medidas de adaptación al cambio climático en ecosistemas forestales

Localización en el mapa	Efecto del cambio climático	Respuesta de adaptación	Referencias y recursos
1	Temporada de incendios forestales más larga y mayor superficie quemada.	Clarear los bosques y realizar quemas controladas y culturales para reducir el riesgo de incendios forestales de alta severidad y promover las plantas valiosas.	Long <i>et al.</i> 2021 <sup>157</sup> Marks-Block <i>et al.</i> 2019 <sup>158</sup> Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washington (Washington State Department of Natural Resources, WA DNR) 2020 <sup>159</sup>
2	Las especies y los genotipos pueden estar mal adaptados al clima futuro.	Genotipos y especies vegetales considerados más tolerantes al aumento de las temperaturas y al cambio de los regímenes de perturbación.	St. Clair <i>et al.</i> 2022 <sup>160</sup> Instituto del Norte de Ciencias Climáticas Aplicadas (Northern Institute of Applied Climate Science, NIACS) 2022 <sup>161</sup> NIACS 2022 <sup>162</sup>
3	El aumento de las temperaturas y otros factores de estrés amenazan los bosques urbanos.	Desarrollar técnicas silvícolas para mantener los bosques urbanos.	Piana <i>et al.</i> 2021 <sup>163</sup> Piana <i>et al.</i> 2021 <sup>164</sup> Pregitzer <i>et al.</i> 2019 <sup>165</sup>
4	Los planes de adaptación al cambio climático no suelen estar adaptados a las necesidades de los pueblos indígenas.	Desarrollar un menú tribal de adaptación al cambio climático para incorporar los valores tribales y las consideraciones culturales en la planificación de la adaptación al clima.	Equipo del Menú de Adaptación Tribal 2019 <sup>166</sup>
5	Inundaciones más frecuentes y severas.	Reubicar y restaurar las infraestructuras relacionadas con la recreación en las llanuras aluviales vulnerables.	NIACS 2022 <sup>167</sup>
6	Los huracanes más intensos aumentan los árboles derribados y dañados.	Aumentar la capacidad de aprender de los desastres y gestionar los restos vegetales para recuperar valor y secuestrar carbono.	Álvarez-Berrios <i>et al.</i> 2021 <sup>168</sup> Wiener <i>et al.</i> 2020 <sup>169</sup>

Tener en cuenta todos las tierras y personas mejora las evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático, debido a las numerosas políticas y prácticas de gestión federales, estatales, territoriales, municipales, privadas, tribales e indígenas que rigen los bosques. Las opciones de adaptación difieren según la región, la apropiación y los objetivos de gestión, lo que refleja las diferencias climáticas y ecológicas regionales, el historial de gestión y los valores locales. Sin embargo, los principios generales de adaptación son válidos en todas las zonas geográficas y en todas las propiedades, y son coherentes con los principios de la gestión forestal sostenible. Por ejemplo, en los bosques templados propensos a la sequía, la reducción de la densidad arbórea aumenta la resistencia (la capacidad de permanecer prácticamente inalterados por las perturbaciones) y la resiliencia (la capacidad de recuperarse después de una perturbación) frente a los escarabajos de la corteza y la sequía<sup>170,171</sup> y, cuando se combina con tratamientos de reducción del combustible (p. ej., incendios controlados), la resiliencia a los incendios forestales<sup>145,146</sup>. En los bosques propensos a los incendios, la reintroducción de incendios de severidad baja o mixta y la incorporación de los conocimientos indígenas a la gestión de los incendios pueden reducir el riesgo de incendios forestales de alta severidad y promover valiosos servicios ecosistémicos<sup>172,173</sup> (Tabla 7.1; KM 16.3). Promover la diversidad biológica también es una estrategia de adaptación común<sup>150</sup>, ya que las zonas forestales de gran diversidad mantienen mejor las funciones de los ecosistemas<sup>174</sup>. Aumentar la diversidad de rasgos funcionales, como la tolerancia a la sombra, el tamaño de las semillas, la superficie foliar específica, la capacidad de rebrote y el grosor de la corteza, puede dar a los bosques más posibilidades de adaptarse a las perturbaciones relacionadas con el clima<sup>174,175</sup>.

Están surgiendo oportunidades para integrar mejor las consideraciones sociales de los cambios provocados por el clima en los bosques y la gestión forestal, a medida que los marcos y las evaluaciones de la vulnerabilidad socioecológica amplían su tratamiento de las dimensiones sociales<sup>176,177</sup>. Por ejemplo, las evaluaciones pueden considerar los cambios ecológicos y la alteración de los servicios ecosistémicos a la luz de las características socioeconómicas (p. ej., la vulnerabilidad social) y el bienestar de los beneficiarios de los servicios ecosistémicos, incluida la capacidad social para adaptarse a las nuevas condiciones. El acceso a los bosques y a los servicios ecosistémicos asociados, incluidos los recreativos, difiere de los entornos urbanos a los rurales y de acuerdo con características socioeconómicas como la identidad racial y étnica. Por ejemplo, los propietarios de tierras negras del Sur se enfrentan a un legado de desigualdad de acceso a la extensión y la gestión forestal, así como a la inseguridad de la apropiación y a un rendimiento económico mínimo de las tierras heredadas sin testamento<sup>178</sup>. Los análisis de justicia ambiental pueden utilizarse para considerar el acceso a los bosques, la asistencia técnica para la gestión forestal y los servicios ecosistémicos, así como los sucesos peligrosos como el humo de los incendios forestales<sup>179,180</sup>.

La salud y la gestión de los bosques están vinculadas al bienestar socioeconómico de los pueblos indígenas y tribales, donde la gestión de los ecosistemas forestales está interrelacionada con la identidad cultural (KM 16.3)<sup>181,182</sup>. Tales perspectivas conducen a diferentes opciones de adaptación con énfasis en la gestión activa diseñada para mantener relaciones recíprocas. Por ejemplo, muchos Diné (Navajos) dependen directamente de la tierra para su subsistencia y sus tradiciones culturales, y los bosques les brindan recursos sociales, culturales, espirituales y económicos. Si el calentamiento continúa, se proyectan pérdidas forestales sustanciales para los Diné. Se han propuesto ambiciosas estrategias de plantación de árboles para compensar estas pérdidas y satisfacer las necesidades futuras de recursos (p. ej., para leña; el 50 % de los hogares Diné utilizan la madera como fuente primaria de calefacción)<sup>183</sup>.

La adaptación de las prácticas de reforestación, incluido el dónde se plantan las especies y qué especies y genotipos se plantan, facilitará la adaptación a las condiciones climáticas futuras. La migración asistida puede ayudar a hacer frente a los efectos del cambio climático promoviendo especies arbóreas y genotipos que se espera que sobrevivan a climas y regímenes de perturbación futuros<sup>184</sup>. La migración asistida abarca 1) la migración asistida de poblaciones dentro del área de distribución de una especie; 2) la expansión asistida del área de distribución adyacente al área de distribución de una especie; y 3) la migración asistida de



especies que las desplaza lejos de su área de distribución<sup>185</sup>. Las orientaciones específicas sobre migración asistida son escasas, pero existen herramientas como la toma de decisiones jerárquica<sup>186</sup>, la herramienta de selección de lotes de siembra<sup>160</sup> y la Herramienta de Evaluación del Riesgo Ecológico de la Reubicación Dirigida<sup>187</sup> que brindan orientación.

La migración asistida y los esfuerzos de reforestación se ven limitados por la disponibilidad poco fiable de plántones adaptados al clima u otros recursos<sup>188</sup>. Las intervenciones de adaptación pueden centrarse en alterar la exposición de los bosques al cambio climático o la demanda de servicios ecosistémicos. Las intervenciones incluyen la gestión forestal que altera las estructuras o la composición de los rodales, el refuerzo de la respuesta a las perturbaciones y el refuerzo de la restauración después de las perturbaciones<sup>189,190</sup>. Las acciones de los propietarios forestales privados para adaptarse al cambio climático están limitadas social, institucional y económicamente (p. ej. Andersson y Keskitalo 2018<sup>191</sup>); por lo tanto, la política y los incentivos basados en el mercado tienen el potencial de aumentar la adaptación en tierras privadas (p. ej., Anderson *et al.* 2019<sup>192</sup>). Las posibles políticas incluyen normativas que exijan acciones de adaptación, subvenciones (pagos directos y reducciones fiscales) que reduzcan los costos privados de las acciones o contabilicen los beneficios públicos de las acciones privadas<sup>193</sup> e impuestos que aumenten los costos privados de la inacción o de las acciones que hacen que los bosques sean menos resilientes al cambio climático (p. ej., Hashida *et al.*, 2020<sup>194</sup>). Dado que los beneficios futuros de una intervención privada son inciertos, las subvenciones (p. ej., para la gestión de combustibles peligrosos) también reducen los riesgos financieros (p. ej., Amacher *et al.* 2006<sup>195</sup>).

La implementación efectiva de la adaptación al cambio climático exige trabajar en paisajes con gobiernos complejos<sup>196</sup>. Los resultados equitativos se mejoran mediante la coproducción de conocimientos (es decir, con la participación de múltiples fuentes de conocimiento y capacidades de diferentes grupos de personas) que determinan los riesgos esperados, los beneficios futuros deseados y la capacidad para implementar medidas de adaptación<sup>197</sup>.

## Cuentas trazables

### Descripción del proceso

La selección de los autores se centró en la experiencia científica y en garantizar que, en la medida de lo posible, el equipo de autores representara un amplio abanico de experiencias. En primer lugar, el autor principal del capítulo (chapter lead, CL) y el autor principal de coordinación federal (coordinating lead author, CLA) desarrollaron un esquema de temas generales basado en la revisión de evaluaciones anteriores, un análisis de brechas del Programa Estadounidense de Investigación sobre el Cambio Global (US Global Change Research Program, USGCRP) y nuevos hallazgos desde la anterior Evaluación Nacional del Clima<sup>11</sup>. El esquema sirvió de base para identificar los conocimientos necesarios para completar el capítulo. Luego, el CL y el CLA elaboraron de forma independiente las listas iniciales de autores siguiendo los criterios de diversidad y las orientaciones aportadas por el USGCRP. Es importante señalar que antes de la selección de los autores, incluidos el CL y el CLA, el capítulo fue designado por el Comité Directivo Federal como un capítulo con todos los autores federales, con la opción de incluir autores no federales como contribuyentes técnicos. El CL y el CLA se basaron en gran medida en la lista pre poblada de personas designadas a través de la convocatoria pública de autores del USGCRP para compilar las listas iniciales de autores. A continuación, el CL y el CLA revisaron sus listas iniciales de autores por tema de capítulo utilizando los criterios de diversidad para llegar a la lista final de autores de capítulos.

El equipo de autores se reunía semanalmente para debatir la evolución de los capítulos, los comentarios y los plazos. Se identificaron y añadieron otros autores de capítulos y contribuyentes técnicos para aumentar la profundidad y diversificar las perspectivas. Para tomar estas decisiones se tuvieron en cuenta las reuniones del equipo de autores, las revisiones y los comentarios recibidos de las agencias gubernamentales estadounidenses y del público en general. Para llegar a un consenso, se aprovechó la experiencia específica de los autores de los capítulos y se consultó la literatura revisada por expertos, en la que se dio gran importancia a los artículos publicados en los últimos cinco años. La participación del público se produjo a través de un taller celebrado en enero de 2022 y de oportunidades para la revisión pública. El compromiso con otros capítulos se produjo a través de reuniones entre los líderes de los capítulos.

### Mensaje clave 7.1

## El cambio climático y las perturbaciones afectan cada vez más los bosques

### Descripción de la base de evidencia

Abundantes publicaciones revisadas por expertos indican que el cambio climático ha aumentado la frecuencia, la escala espacial y la severidad de algunas perturbaciones que impulsan el cambio forestal<sup>56,198,199</sup>. Algunos ejemplos notables son el área quemada por los incendios forestales en el Oeste<sup>200</sup>, el área quemada por grandes incendios forestales en el Oeste<sup>13</sup> y el área quemada de alta severidad en el Oeste<sup>18</sup>. Más de la mitad (55 %) de los cambios en la aridez del combustible en los bosques del oeste de los EE. UU. son atribuibles directamente al cambio climático<sup>12</sup> y las relaciones entre incendios forestales y clima (baja precipitación/sequía o interacciones entre temperatura y precipitación) explican las tendencias y la mayor parte de la variación en la superficie quemada<sup>14,15,200,201</sup>. Proyecciones de futuros incendios forestales<sup>14,202</sup> indican impulsores climáticos, y se espera que las respuestas de los bosques difieran con el tipo de bosque y los combustibles, con el potencial de que las retroalimentaciones de combustible limiten finalmente los aumentos en el área quemada (Kitzberger *et al.* 2017,<sup>203</sup> pero consulte Abatzoglou *et al.* 2021<sup>16</sup>). También existe evidencia sólida y creciente de que el calentamiento está reduciendo la mortalidad durante el invierno

y aumentando el voltinismo (número de generaciones) de algunos escarabajos de la corteza<sup>26,29,63</sup>, lo que ocasiona grandes impactos, especialmente en el oeste, y expansiones de las áreas de distribución geográfica y de árboles huéspedes tanto en el Noreste como en el Oeste<sup>26,63</sup>. En el Suroeste, una sequía excepcional ha comprometido las defensas de los árboles huéspedes, lo que ha provocado un aumento de los impactos de los escarabajos de la corteza<sup>58,60,61,204</sup>. A pesar de los cambios físicos bien descritos en los combustibles forestales después de los brotes de escarabajos de la corteza, los efectos sobre los incendios forestales son variados. Estas contradicciones se explican en gran medida por las diferentes métricas utilizadas para evaluar los incendios forestales, el tiempo transcurrido desde el brote, la escala espacial de los estudios y los efectos desconcertantes de las condiciones meteorológicas de los incendios y los impactos de los escarabajos<sup>66</sup>. Los patógenos, los eventos meteorológicos extremos (huracanes, vientos e inundaciones) y el aumento del nivel del mar tienen menos evidencia que apoyen conexiones generalizadas entre las perturbaciones y el clima, en parte porque la atribución es difícil para fenómenos que ocurren pocas veces. Se prevé que el calentamiento continuado y los cambios regionales en las precipitaciones amplifiquen las interacciones entre los agentes perturbadores y alteren aún más la estructura y función de los ecosistemas forestales. Se dispone de evidencia de cambios en las áreas de distribución de las especies arbóreas afectadas por el cambio climático en algunas zonas<sup>205,206,207</sup>; sin embargo, los cambios en el área de distribución de las especies del sotobosque dependerán de si el dosel se ve afectado<sup>49,208</sup>.

### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Una incertidumbre importante es el papel de las perturbaciones relacionadas con el clima en la transformación del paisaje, o la transición permanente a un tipo de vegetación diferente, tal vez no forestal. La proyección de los futuros cambios forestales y los efectos resultantes sobre los servicios ecosistémicos debe basarse en la capacidad de simular y anticipar la aparición (a veces rápida) de nuevos tipos de vegetación. Una brecha clave en la investigación es si las acciones de gestión pueden alterar los efectos de las perturbaciones provocadas por el clima y las trayectorias de los ecosistemas forestales resultantes, y en qué medida. Por ejemplo, las diferencias en el tipo de bosque y el historial de gestión afectan los combustibles disponibles para el fuego y cómo los cambios climáticos alteran su inflamabilidad o susceptibilidad a los insectos u otras perturbaciones. En consecuencia, la gestión específica de los bosques puede ser capaz de alterar algunos o la mayoría de los efectos climáticos proyectados, en igualdad de condiciones, principalmente en el caso de los incendios forestales. Otra brecha en la investigación es la capacidad de modelar las respuestas hidrológicas en cuencas boscosas con combinaciones novedosas de clima y perturbaciones.

### Descripción de confianza y probabilidad

La mayoría de la literatura científica sobre perturbaciones forestales respalda una *confianza alta* sobre el papel de las perturbaciones relacionadas con el clima en la estructuración de los ecosistemas forestales, aunque las estimaciones de la fuerza de las relaciones entre el clima y las perturbaciones varían según los mecanismos y los métodos. Sin embargo, los mecanismos por los que interactúan las perturbaciones y el grado en que afectarán de forma crónica o aguda los bosques difieren enormemente según el tipo y la naturaleza de la perturbación. Por ejemplo, las interacciones entre los incendios forestales y los escarabajos de la corteza están bien documentadas y pueden amplificarse con el tiempo, mientras que las interacciones entre la sequía y los patógenos son poco conocidas. Las perturbaciones pueden alterar rápidamente la estructura y la dinámica de los bosques, así como otros valores de los recursos (p. ej., las actividades recreativas) y las condiciones socioeconómicas. Es *probable* que estas dinámicas continúen, pero es difícil proyectar en qué medida se parecerán a las dinámicas con las que tenemos experiencia. Por lo tanto, hay una *confianza alta* de que las futuras perturbaciones alterarán aún más la estructura y función de los bosques.



## Mensaje clave 7.2

### El cambio climático afecta los servicios ecosistémicos que los bosques aportan

#### Descripción de la base de evidencia

Abundante literatura revisada por expertos corrobora cómo el cambio climático está afectando los servicios de los ecosistemas. La mayoría de las investigaciones respaldan que el aumento de la temperatura del aire y el cambio de los patrones de precipitación están reduciendo la capacidad de los bosques estadounidenses para secuestrar y almacenar carbono, especialmente en el Oeste<sup>3</sup>. También hay evidencia fehaciente de que el cambio climático está reduciendo la acumulación de nieve y disminuyendo el suministro de agua en el Oeste<sup>125</sup>. La temperatura de los arroyos está aumentando en muchas regiones, lo que reduce el hábitat de los peces de agua fría<sup>137,138</sup>. El aumento de la frecuencia de los grandes incendios forestales en el Oeste reduce la calidad del aire y del agua<sup>103,132,134,209,210</sup> y, cuando se combinan con una interfaz urbano-forestal (Wildland-Urban Interface, WUI) en expansión<sup>5</sup>, probablemente aumentan las pérdidas de estructuras.

El cambio climático afecta la madera al aumentar el área quemada por los incendios forestales<sup>211</sup> y al aumentar el área y la severidad de los brotes de escarabajos de la corteza<sup>26,58</sup>, lo que se traduce en una mayor recuperación de la madera y en una disminución de su valor. En algunas zonas, los brotes de escarabajos también han reducido la belleza paisajística, el valor de la propiedad y los ingresos por impuestos sobre bienes inmuebles de los gobiernos locales<sup>100</sup>. Los productos no madereros de algunas partes de los EE. UU. están cada vez más sujetos a una producción variable, debido al aumento de las perturbaciones relacionadas con el clima y a la variabilidad de las temperaturas y la estacionalidad<sup>212</sup>, lo que afecta los beneficios de los servicios culturales de los ecosistemas, en particular para los pueblos indígenas y tribales<sup>90,213</sup>. Por ejemplo, en el Medio Oeste y el Noreste, el aumento de las temperaturas promedio invernales y la reducción de la profundidad de la nieve han aumentado la severidad de la garrapata invernal (*Dermacentor albipictus*) y del gusano del cerebro (*Parelaphostrongylus tenuis*)<sup>214,215</sup> en alces, lo que aumenta la mortalidad de adultos y crías y reduce las oportunidades de caza<sup>216,217,218</sup>. El aumento del nivel del mar está provocando la aparición de bosques fantasma, lo que modifica las actividades recreativas y afecta la capacidad de amortiguación de las marejadas ciclónicas<sup>219,220</sup>. También se proyecta que el aumento del nivel del mar supere las tasas de crecimiento de los manglares en las próximas décadas, lo que provocará la pérdida de manglares en muchos lugares<sup>38,39,40</sup>. En respuesta a los inviernos más cálidos, sin embargo, la expansión de los manglares se está produciendo actualmente a lo largo de las costas estadounidenses del Golfo y del Atlántico, al mejorar la protección costera frente a las tormentas y el aumento del nivel del mar, añadir carbono a la biomasa, mejorar el hábitat de los pelícanos, crear pérdida de vistas costeras, aumentar los insectos, reducir el acceso a la pesca y reducir el hábitat de las grullas trompeteras, una especie en peligro de extinción<sup>41</sup>. Se proyecta que el esquí en zonas no urbanizadas y las actividades motorizadas en la nieve en Estados Unidos continental se vean afectadas por el cambio climático a mediados de siglo, con efectos que varían según la región, el escenario del modelo y la medida de participación<sup>93,221</sup>.

#### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Los efectos del cambio climático sobre los valores recreativos son inciertos porque los valores humanos cambian con el tiempo y porque los efectos globales dependerán de cómo cambien los patrones de temperatura y precipitación en los paisajes forestales. Además, la información imprecisa sobre las actividades recreativas históricas ha provocado una falta de significación estadística para las estimaciones cuantitativas de cómo el clima puede estar afectando a determinadas actividades. Existen brechas en la investigación sobre los efectos del cambio climático en los bienes y servicios culturales importantes para los pueblos indígenas y tribales de los EE. UU.

## Descripción de confianza y probabilidad

Investigaciones recientes aportan numerosas evidencia de los efectos directos e indirectos del cambio climático sobre los servicios de los ecosistemas forestales. Existe *confianza alta* de que el cambio climático está afectando múltiples servicios de los ecosistemas, como la pesca en aguas frías, múltiples actividades recreativas, los servicios de los bosques costeros perdidos por el aumento del nivel del mar, los valores de los bosques indígenas, el aprovisionamiento de vida silvestre para consumo y no destinada al consumo y muchos productos forestales no madereros. Existe *confianza alta* de que el cambio climático está afectando el secuestro de carbono en los bosques, el suministro de agua limpia procedente de los bosques, la aparición de incendios forestales que destruyen estructuras, alteran los hábitats y aumentan las emisiones de PM<sub>2,5</sub> y la acumulación de nieve en el Oeste y el Noreste. Existe *confianza media* de que el cambio climático esté modificando la disponibilidad de actividades recreativas basadas en el agua y la nieve. La capacidad de los bosques para seguir aportando servicios ecosistémicos vendrá determinada, en parte, por los cambios que se produzcan en la sociedad y por cómo interactúen esos cambios con los futuros efectos del clima (*probable, confianza alta*).

### Mensaje clave 7.3

**Las medidas de adaptación son necesarias para mantener ecosistemas forestales resilientes**

## Descripción de la base de evidencia

Las evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático brindan la base para la adaptación, y hay muchos ejemplos de evaluaciones de la vulnerabilidad que se han llevado a cabo para diversos propietarios y gestores forestales en los años recientes. Aunque los marcos y ejemplos de planificación de la adaptación siguen siendo más numerosos que las acciones de adaptación, la literatura reciente contiene un número creciente de acciones de adaptación implementadas para aumentar la resistencia y la resiliencia de los bosques al cambio climático (Tabla 7.1). La investigación sobre los efectos del cambio climático y los esfuerzos de adaptación recurre cada vez más a procesos de coproducción, iterativos y colaborativos que combinan distintos tipos de conocimientos y participantes para producir una ciencia efectiva sobre la adaptación al clima<sup>222</sup>.

Aunque al momento de determinar las opciones de adaptación al cambio climático es fundamental tener en cuenta el contexto local y los objetivos de gestión, existen principios generales aplicables a todos los tipos de bosque. Los principios de adaptación que reciben un fuerte apoyo en la literatura científica incluyen la promoción de la diversidad, la modificación de las prácticas de plantación, la implementación de la migración asistida y el aumento de la resiliencia a las perturbaciones. Una mezcla de especies arbóreas y rasgos funcionales<sup>223</sup> en una masa forestal aumenta la probabilidad de que las perturbaciones, como los brotes de insectos y enfermedades, no provoquen la mortalidad total de la masa, que los bosques sean más capaces de soportar condiciones ambientales cambiantes y que se puedan suministrar múltiples servicios ecosistémicos<sup>174,224</sup>. Existe evidencia sólida y cada vez más numerosa de que la reducción de la densidad de las masas en muchos tipos de bosques propensos a los incendios 1) aumenta la resistencia y la resiliencia a las perturbaciones, incluidas las sequías, los escarabajos de la corteza y los incendios forestales<sup>145,146,157,170,225</sup>; y 2) mejora el crecimiento residual de los árboles al reducir la carga de combustible, disminuir la competencia entre árboles y aumentar la disponibilidad de agua<sup>225,226,227</sup>.

### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

La identificación de las acciones de adaptación al cambio climático se basa en nuestra comprensión actual de la función de los ecosistemas y de cómo las acciones de gestión afectan la función de los ecosistemas. Sin embargo, la comprensión de la efectividad de las medidas de adaptación al cambio climático se ve limitada por la falta de seguimiento a largo plazo durante varias décadas. El seguimiento futuro será fundamental para evaluar la efectividad de las medidas de adaptación en distintos contextos, sobre todo porque las interacciones entre múltiples perturbaciones podrían provocar efectos inesperados en los ecosistemas y en su respuesta a las medidas de adaptación. La implementación de las medidas de adaptación se encuentra todavía en una fase relativamente temprana, y se espera que persistan los obstáculos a la implementación de las medidas de adaptación, lo que limitará el ritmo, la escala y la efectividad de la adaptación en el futuro.

### Descripción de confianza y probabilidad

Existe *confianza alta* de que los cambios climáticos de las últimas décadas ya están afectando a la capacidad de los propietarios de tierras y gestores forestales para cumplir los objetivos de gestión. Esto se debe principalmente al aumento de las perturbaciones severas, sobre todo incendios forestales, brotes de escarabajos de la corteza en el Oeste y tormentas en las zonas costeras del Este. Esto se basa en la proliferación de literatura revisada por expertos para apoyar una gestión y planificación basada en el clima, así como diversas directrices y fuentes de opciones de adaptación desarrolladas por agencias y organizaciones no gubernamentales. Basándose en la comprensión de los ecosistemas forestales y los efectos de las acciones de gestión, existe *confianza media* en que las acciones de adaptación serán efectivas para ayudar a mantener la provisión de servicios ecosistémicos. Es necesario un seguimiento continuo para evaluar la efectividad de las medidas de adaptación.



## Referencias

1. Bonan, G.B., 2016: Forests, climate, and public policy: A 500-year interdisciplinary odyssey. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **47** (1), 97–121. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032359>
2. Oswalt, S.N., W.B. Smith, P.D. Miles, and S.A. Pugh, 2019: Forest Resources of the United States, 2017: A Technical Document Supporting the Forest Service 2020 RPA Assessment. Gen. Tech. Rep. WO-97. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office, Washington, DC, 223 pp. <https://doi.org/10.2737/wo-gtr-97>
3. Domke, G.M., B.F. Walters, C.L. Giebink, E.J. Greenfield, J.E. Smith, M.C. Nichols, J.A. Knott, S.M. Ogle, J.W. Coulston, and J. Steller, 2023: Greenhouse Gas Emissions and Removals from Forest Land, Woodlands, Urban Trees, and Harvested Wood Products in the United States, 1990–2021. *Resour. Bull. WO-101*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office, Washington, DC, 10 pp. <https://doi.org/10.2737/wo-rb-101>
4. Zhang, Y., C. Song, T. Hwang, K. Novick, J.W. Coulston, J. Vose, M.P. Dannenberg, C.R. Hakkenberg, J. Mao, and C.E. Woodcock, 2021: Land cover change-induced decline in terrestrial gross primary production over the conterminous United States from 2001 to 2016. *Agricultural and Forest Meteorology*, **308–309**, 108609. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108609>
5. Mockrin, M.H., D. Helmers, S. Martinuzzi, T.J. Hawbaker, and V.C. Radeloff, 2022: Growth of the wildland-urban interface within and around U.S. National Forests and Grasslands, 1990–2010. *Landscape and Urban Planning*, **218**, 104283. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104283>
6. AF&PA, 2022: Our Economic Impact. American Forest and Paper Association. <https://www.afandpa.org/statistics-resources/our-economic-impact>
7. Hartmann, H., A. Bastos, A.J. Das, A. Esquivel-Muelbert, W.M. Hammond, J. Martínez-Vilalta, N.G. McDowell, J.S. Powers, T.A.M. Pugh, K.X. Ruthrof, and C.D. Allen, 2022: Climate change risks to global forest health: Emergence of unexpected events of elevated tree mortality worldwide. *Annual Review of Plant Biology*, **73** (1), 673–702. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804>
8. Moser, S.C., J.A. Ekstrom, J. Kim, and S. Heitsch, 2019: Adaptation finance archetypes: Local governments' persistent challenges of funding adaptation to climate change and ways to overcome them. *Ecology and Society*, **24** (2), 28. <https://doi.org/10.5751/es-10980-240228>
9. USDA, 2022: Climate Resilience and Carbon Stewardship of America's National Forests and Grasslands. Secretary's Memorandum 1077-004. U.S. Department of Agriculture, Office of the Secretary, Washington, DC. <https://www.usda.gov/directives/sm-1077-004>
10. USDA, 2021: Action Plan for Climate Adaptation and Resilience. Departmental Regulation 1070-001. U.S. Department of Agriculture. <https://www.sustainability.gov/pdfs/usda-2021-cap.pdf>
11. Vose, J.M., D.L. Peterson, G.M. Domke, C.J. Fettig, L.A. Joyce, R.E. Keane, C.H. Luce, J.P. Prestemon, L.E. Band, J.S. Clark, N.E. Cooley, A. D'Amato, and J.E. Halofsky, 2018: Ch. 6. Forests. 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, 232–267. <https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch6>
12. Abatzoglou, J.T. and A.P. Williams, 2016: Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113** (42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
13. Dennison, P.E., S.C. Brewer, J.D. Arnold, and M.A. Moritz, 2014: Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011. *Geophysical Research Letters*, **41** (8), 2928–2933. <https://doi.org/10.1002/2014gl059576>
14. Littell, J.S., D. McKenzie, H.Y. Wan, and S.A. Cushman, 2018: Climate change and future wildfire in the western United States: An ecological approach to nonstationarity. *Earth's Future*, **6** (8), 1097–1111. <https://doi.org/10.1029/2018ef000878>
15. Holden, Z.A., A. Swanson, C.H. Luce, W.M. Jolly, M. Maneta, J.W. Oyler, D.A. Warren, R. Parsons, and D. Affleck, 2018: Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115** (36), E8349–E8357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802316115>

16. Abatzoglou, J.T., D.S. Battisti, A.P. Williams, W.D. Hansen, B.J. Harvey, and C.A. Kolden, 2021: Projected increases in western US forest fire despite growing fuel constraints. *Communications Earth & Environment*, **2** (1), 227. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00299-0>
17. Kennedy, M.C., R.R. Bart, C.L. Tague, and J.S. Choate, 2021: Does hot and dry equal more wildfire? Contrasting short- and long-term climate effects on fire in the Sierra Nevada, CA. *Ecosphere*, **12** (7), e03657. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3657>
18. Parks, S.A. and J.T. Abatzoglou, 2020: Warmer and drier fire seasons contribute to increases in area burned at high severity in western US forests from 1985 to 2017. *Geophysical Research Letters*, **47** (22), e2020GL089858. <https://doi.org/10.1029/2020gl089858>
19. Jones, M.W., J.T. Abatzoglou, S. Veraverbeke, N. Andela, G. Lasslop, M. Forkel, A.J.P. Smith, C. Burton, R.A. Betts, G.R. van der Werf, S. Sitch, J.G. Canadell, C. Santin, C. Kolden, S.H. Doerr, and C. Le Quéré, 2022: Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, **60** (3), e2020RG000726. <https://doi.org/10.1029/2020rg000726>
20. Parks, S.A., C. Miller, J.T. Abatzoglou, L.M. Holsinger, M.-A. Parisien, and S.Z. Dobrowski, 2016: How will climate change affect wildland fire severity in the western US? *Environmental Research Letters*, **11** (3), 035002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035002>
21. Jain, P., X. Wang, and M.D. Flannigan, 2017: Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015. *International Journal of Wildland Fire*, **26** (12), 1009–1020. <https://doi.org/10.1071/wf17008>
22. Abatzoglou, J.T., A.P. Williams, and R. Barbero, 2019: Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. *Geophysical Research Letters*, **46** (1), 326–336. <https://doi.org/10.1029/2018gl080959>
23. Balch, J.K., B.A. Bradley, J.T. Abatzoglou, R.C. Nagy, E.J. Fusco, and A.L. Mahood, 2017: Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114** (11), 2946–2951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>
24. Chiodi, A.M., B.E. Potter, and N.K. Larkin, 2021: Multi-decadal change in western US nighttime vapor pressure deficit. *Geophysical Research Letters*, **48** (15), e2021GL092830. <https://doi.org/10.1029/2021gl092830>
25. Bailey, R.G., 2016: Bailey's Ecoregions and Subregions of the United States, Puerto Rico, and the U.S. Virgin Islands. U.S. Geological Survey, Forest Service Research Data Archive, Fort Collins, CO. <https://doi.org/10.2737/RDS-2016-0003>
26. Bentz, B.J., J. Régnière, C.J. Fettig, E.M. Hansen, J.L. Hayes, J.A. Hicke, R.G. Kelsey, J.F. Negrón, and S.J. Seybold, 2010: Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and indirect effects. *BioScience*, **60** (8), 602–613. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6>
27. Fettig, C.J., C. Asaro, J.T. Nowak, K.J. Dodds, K.J.K. Gandhi, J.E. Moan, and J. Robert, 2022: Trends in bark beetle impacts in North America during a period (2000–2020) of rapid environmental change. *Journal of Forestry*, **120** (6), 693–713. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvac021>
28. O'Connor, C.D., A.M. Lynch, D.A. Falk, and T.W. Swetnam, 2015: Post-fire forest dynamics and climate variability affect spatial and temporal properties of spruce beetle outbreaks on a Sky Island mountain range. *Forest Ecology and Management*, **336**, 148–162. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.10.021>
29. Robbins, Z.J., C. Xu, B.H. Aukema, P.C. Buotte, R. Chitra-Tarak, C.J. Fettig, M.L. Goulden, D.W. Goodsman, A.D. Hall, C.D. Koven, L.M. Kueppers, G.D. Madakumbura, L.A. Mortenson, J.A. Powell, and R.M. Scheller, 2022: Warming increased bark beetle-induced tree mortality by 30% during an extreme drought in California. *Global Change Biology*, **28** (2), 509–523. <https://doi.org/10.1111/gcb.15927>
30. Dudley, J., C.E. Willing, A.J. Das, A.M. Latimer, J.C.B. Nesmith, and J.J. Battles, 2021: Nonlinear shifts in infectious rust disease due to climate change. *Nature Communications*, **12** (1), 5102. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25182-6>
31. 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)

32. Trauernicht, C., E. Pickett, C.P. Giardina, C.M. Litton, S. Cordell, and A. Beavers, 2015: The contemporary scale and context of wildfire in Hawai'i. *Pacific Science*, **69** (4), 427–444. <https://doi.org/10.2984/69.4.1>
33. 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>
34. Anderson-Teixeira, K.J., A.D. Miller, J.E. Mohan, T.W. Hudiburg, B.D. Duval, and E.H. DeLucia, 2013: Altered dynamics of forest recovery under a changing climate. *Global Change Biology*, **19** (7), 2001–2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.12194>
35. Matthews, E.R., J.P. Schmit, and J.P. Campbell, 2016: Climbing vines and forest edges affect tree growth and mortality in temperate forests of the U.S. Mid-Atlantic States. *Forest Ecology and Management*, **374**, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.005>
36. Hammond, W.M., A.P. Williams, J.T. Abatzoglou, H.D. Adams, T. Klein, R. López, C. Sáenz-Romero, H. Hartmann, D.D. Breshears, and C.D. Allen, 2022: Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, **13** (1), 1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
37. Grieger, R., S.J. Capon, W.L. Hadwen, and B. Mackey, 2020: Between a bog and a hard place: A global review of climate change effects on coastal freshwater wetlands. *Climatic Change*, **163** (1), 161–179. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02815-1>
38. Saintilan, N., N.S. Khan, E. Ashe, J.J. Kelleway, K. Rogers, C.D. Woodroffe, and B.P. Horton, 2020: Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. *Science*, **368** (6495), 1118–1121. <https://doi.org/10.1126/science.aba2656>
39. Sasmito, S.D., D. Murdiyarso, D.A. Friess, and S. Kurnianto, 2016: Can mangroves keep pace with contemporary sea level rise? A global data review. *Wetlands Ecology and Management*, **24** (2), 263–278. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9466-7>
40. Ward, R.D., D.A. Friess, R.H. Day, and R.A. Mackenzie, 2016: Impacts of climate change on mangrove ecosystems: A region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, **2** (4), e01211. <https://doi.org/10.1002/ehs2.1211>
41. 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>
42. Haggmann, R.K., P.F. Hessburg, S.J. Prichard, N.A. Povak, P.M. Brown, P.Z. Fulé, R.E. Keane, E.E. Knapp, J.M. Lydersen, K.L. Metlen, M.J. Reilly, A.J. Sánchez Meador, S.L. Stephens, J.T. Stevens, A.H. Taylor, L.L. Yocom, M.A. Battaglia, D.J. Churchill, L.D. Daniels, D.A. Falk, P. Henson, J.D. Johnston, M.A. Krawchuk, C.R. Levine, G.W. Meigs, A.G. Merschel, M.P. North, H.D. Safford, T.W. Swetnam, and A.E.M. Waltz, 2021: Evidence for widespread changes in the structure, composition, and fire regimes of western North American forests. *Ecological Applications*, **31** (8), e02431. <https://doi.org/10.1002/eap.2431>
43. Falk, D.A., P.J. van Mantgem, J.E. Keeley, R.M. Gregg, C.H. Guiterman, A.J. Tepley, D. Jn Young, and L.A. Marshall, 2022: Mechanisms of forest resilience. *Forest Ecology and Management*, **512**, 120129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120129>
44. Stanke, H., A.O. Finley, G.M. Domke, A.S. Weed, and D.W. MacFarlane, 2021: Over half of western United States' most abundant tree species in decline. *Nature Communications*, **12** (1), 451. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20678-z>
45. Crausbay, S.D., H.R. Sofaer, A.E. Cravens, B.C. Chaffin, K.R. Clifford, J.E. Gross, C.N. Knapp, D.J. Lawrence, D.R. Magness, A.J. Miller-Rushing, G.W. Schuurman, and C.S. Stevens-Rumann, 2022: A science agenda to inform natural resource management decisions in an era of ecological transformation. *BioScience*, **72** (1), 71–90. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab102>
46. 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>
47. Keeley, J.E., P. van Mantgem, and D.A. Falk, 2019: Fire, climate and changing forests. *Nature Plants*, **5** (8), 774–775. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0485-x>



48. IPCC, 2022: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, and J. Malley, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
49. Spicer, M.E., H.V.N. Radhamoni, M.C. Duguid, S.A. Queenborough, and L.S. Comita, 2022: Herbaceous plant diversity in forest ecosystems: Patterns, mechanisms, and threats. *Plant Ecology*, **223** (2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01202-9>
50. Ash, J.D., T.J. Givnish, and D.M. Waller, 2017: Tracking lags in historical plant species' shifts in relation to regional climate change. *Global Change Biology*, **23** (3), 1305–1315. <https://doi.org/10.1111/gcb.13429>
51. Harrison, S., E.I. Damschen, and J.B. Grace, 2010: Ecological contingency in the effects of climatic warming on forest herb communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107** (45), 19362–19367. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006823107>
52. Cansler, C.A., V.R. Kane, P.F. Hessburg, J.T. Kane, S.M.A. Jeronimo, J.A. Lutz, N.A. Povak, D.J. Churchill, and A.J. Larson, 2022: Previous wildfires and management treatments moderate subsequent fire severity. *Forest Ecology and Management*, **504**, 119764. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119764>
53. Larson, A.J., S.M.A. Jeronimo, P.F. Hessburg, J.A. Lutz, N.A. Povak, C.A. Cansler, V.R. Kane, and D.J. Churchill, 2022: Tamm review: Ecological principles to guide post-fire forest landscape management in the inland Pacific and northern Rocky Mountain regions. *Forest Ecology and Management*, **504**, 119680. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119680>
54. Prichard, S.J., P.F. Hessburg, R.K. Hagemann, N.A. Povak, S.Z. Dobrowski, M.D. Hurteau, V.R. Kane, R.E. Keane, L.N. Kobziar, C.A. Kolden, M. North, S.A. Parks, H.D. Safford, J.T. Stevens, L.L. Yocom, D.J. Churchill, R.W. Gray, D.W. Huffman, F.K. Lake, and P. Khatri-Chhetri, 2021: Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions. *Ecological Applications*, **31** (8), e02433. <https://doi.org/10.1002/eap.2433>
55. Sonti, N.F., R. Riemann, M.H. Mockrin, and G.M. Domke, 2023: Expanding wildland-urban interface alters forest structure and landscape context in the northern United States. *Environmental Research Letters*, **18** (1), 014010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca77b>
56. Hagemann, R.K., P.F. Hessburg, R.B. Salter, A.G. Merschel, and M.J. Reilly, 2022: Contemporary wildfires further degrade resistance and resilience of fire-excluded forests. *Forest Ecology and Management*, **506**, 119975. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119975>
57. 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>
58. Kolb, T.E., C.J. Fettig, M.P. Ayres, B.J. Bentz, J.A. Hicke, R. Mathiasen, J.E. Stewart, and A.S. Weed, 2016: Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States. *Forest Ecology and Management*, **380**, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051>
59. Hansen, E.M. and B.J. Bentz, 2003: Comparison of reproductive capacity among univoltine, semivoltine, and re-emerged parent spruce beetles (Coleoptera: Scolytidae). *The Canadian Entomologist*, **135** (5), 697–712. <https://doi.org/10.4039/n02-109>
60. Fettig, C.J., L.A. Mortenson, B.M. Bulaon, and P.B. Foulk, 2019: Tree mortality following drought in the central and southern Sierra Nevada, California, U.S. *Forest Ecology and Management*, **432**, 164–178. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.006>
61. Koontz, M.J., A.M. Latimer, L.A. Mortenson, C.J. Fettig, and M.P. North, 2021: Cross-scale interaction of host tree size and climatic water deficit governs bark beetle-induced tree mortality. *Nature Communications*, **12** (1), 129. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20455-y>
62. Robbins, Z.J., C. Xu, A. Jonko, R. Chitra-Tarak, C.J. Fettig, J. Costanza, L.A. Mortenson, B.H. Aukema, L.M. Kueppers, and R.M. Scheller, 2023: Carbon stored in live ponderosa pines in the Sierra Nevada will not return to pre-drought (2012) levels during the 21st century due to bark beetle outbreaks. *Frontiers in Environmental Science*, **11**, 1112756. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1112756>
63. Dodds, K.J., C.F. Aoki, A. Arango-Velez, J. Cancelliere, A.W. D'Amato, M.F. DiGirolomo, and R.J. Rabaglia, 2018: Expansion of southern pine beetle into northeastern forests: Management and impact of a primary bark beetle in a new region. *Journal of Forestry*, **116** (2), 178–191. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvx009>

64. Miller, L.K. and R.A. Werner, 1987: Cold-hardiness of adult and larval spruce beetles *Dendroctonus rufipennis* (Kirby) in interior Alaska. *Canadian Journal of Zoology*, **65** (12), 2927–2930. <https://doi.org/10.1139/z87-444>
65. Morris, J.L., S. Cottrell, C.J. Fettig, R.J. DeRose, K.M. Mattor, V.A. Carter, J. Clear, J. Clement, W.D. Hansen, J.A. Hicke, P.E. Higuera, A.W. Seddon, H. Seppä, R.L. Sherriff, J.D. Stednick, and S.J. Seybold, 2018: Bark beetles as agents of change in social–ecological systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **16** (S1), S34–S43. <https://doi.org/10.1002/fee.1754>
66. Fettig, C.J., J.B. Runyon, C.S. Homicz, P.M.A. James, and M.D. Ulyshen, 2022: Fire and insect interactions in North American forests. *Current Forestry Reports*, **8**, 301–316. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00170-1>
67. Runyon, J.B., C.J. Fettig, J.A. Trilling, A.S. Munson, L.A. Mortenson, B.E. Steed, K.E. Gibson, C.L. Jørgensen, S.R. McKelvey, J.D. McMillin, J.P. Audley, and J.F. Negrón, 2020: Changes in understory vegetation including invasive weeds following mountain pine beetle outbreaks. *Trees, Forests and People*, **2**, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100038>
68. Kleinman, J.S., J.D. Goode, A.C. Fries, and J.L. Hart, 2019: Ecological consequences of compound disturbances in forest ecosystems: A systematic review. *Ecosphere*, **10** (11), e02962. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2962>
69. Raymond, C., R.M. Horton, J. Zscheischler, O. Martius, A. AghaKouchak, J. Balch, S.G. Bowen, S.J. Camargo, J. Hess, K. Kornhuber, M. Oppenheimer, A.C. Ruane, T. Wahl, and K. White, 2020: Understanding and managing connected extreme events. *Nature Climate Change*, **10** (7), 611–621. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0790-4>
70. Tian, X., B. Sohngen, J.B. Kim, S. Ohrel, and J. Cole, 2016: Global climate change impacts on forests and markets. *Environmental Research Letters*, **11** (3), 035011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035011>
71. Johnston, C.M.T. and V.C. Radeloff, 2019: Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116** (29), 14526–14531. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904231116>
72. Anderegg, W.R.L., A.T. Trugman, G. Badgley, C.M. Anderson, A. Bartuska, P. Ciais, D. Cullenward, C.B. Field, J. Freeman, S.J. Goetz, J.A. Hicke, D. Huntzinger, R.B. Jackson, J. Nickerson, S. Pacala, and J.T. Randerson, 2020: Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, **368** (6497), 7005. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>
73. Creutzburg, M.K., R.M. Scheller, M.S. Lucash, S.D. LeDuc, and M.G. Johnson, 2017: Forest management scenarios in a changing climate: Trade-offs between carbon, timber, and old forest. *Ecological Applications*, **27** (2), 503–518. <https://doi.org/10.1002/eap.1460>
74. Nepal, P., J.P. Prestemon, L.A. Joyce, and K.E. Skog, 2022: Global forest products markets and forest sector carbon impacts of projected sea level rise. *Global Environmental Change*, **77**, 102611. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102611>
75. Comerford, D.P., P.G. Schaberg, P.H. Templer, A.M. Soggi, J.L. Campbell, and K.F. Wallin, 2013: Influence of experimental snow removal on root and canopy physiology of sugar maple trees in a northern hardwood forest. *Oecologia*, **171** (1), 261–269. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2393-x>
76. Sanders-DeMott, R., J.L. Campbell, P.M. Groffman, L.E. Rustad, and P.H. Templer, 2019: Ch. 10. Soil warming and winter snowpacks: Implications for northern forest ecosystem functioning. In: *Ecosystem Consequences of Soil Warming*. Mohan, J.E., Ed. Academic Press, 245–278. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813493-1.00011-9>
77. Slatyer, R.A., K.D.L. Umbers, and P.A. Arnold, 2022: Ecological responses to variation in seasonal snow cover. *Conservation Biology*, **36** (1), e13727. <https://doi.org/10.1111/cobi.13727>
78. Sorensen, P.O., A.C. Finzi, M.-A. Giasson, A.B. Reinmann, R. Sanders-DeMott, and P.H. Templer, 2018: Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, **116**, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.026>
79. Sorensen, P.O., P.H. Templer, and A.C. Finzi, 2016: Contrasting effects of winter snowpack and soil frost on growing season microbial biomass and enzyme activity in two mixed-hardwood forests. *Biogeochemistry*, **128** (1), 141–154. <https://doi.org/10.1007/s10533-016-0199-3>
80. Fei, S., S.N. Kivlin, G.M. Domke, I. Jo, E.A. LaRue, and R.P. Phillips, 2022: Coupling of plant and mycorrhizal fungal diversity: Its occurrence, relevance, and possible implications under global change. *New Phytologist*, **234** (6), 1960–1966. <https://doi.org/10.1111/nph.17954>

81. Dangremond, E.M., C.H. Hill, S. Louaibi, and I. Muñoz, 2022: Phenological responsiveness and fecundity decline near the southern range limit of *Trientalis borealis* (Primulaceae). *Plant Ecology*, **223** (1), 41–52. <https://doi.org/10.1007/s11258-021-01190-w>
82. Whyte, K., 2018: Settler colonialism, ecology, and environmental injustice. *Environment and Society*, **9** (1), 125–144. <https://doi.org/10.3167/ares.2018.090109>
83. Durglo, M., R.G. Everett, T. Incashola, M.I. McCarthy, S.H. Pete, J.M. Rosenau, T. Smith, S. Trahan, and A.A. Carlson, 2022: Ch. 7. Šćiþpálq<sup>w</sup>: Biocultural restoration of whitebark pine on the Flathead Reservation. In: *Climate Actions*. CRC Press, 34. <https://doi.org/10.1201/9781003048701>
84. Hitt, N.P., E.L. Snook, and D.L. Massie, 2017: Brook trout use of thermal refugia and foraging habitat influenced by brown trout. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **74** (3), 406–418. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2016-0255>
85. Isaak, D.J., C.H. Luce, D.L. Horan, G.L. Chandler, S.P. Wollrab, and D.E. Nagel, 2018: Global warming of salmon and trout rivers in the northwestern U.S.: Road to ruin or path through purgatory? *Transactions of the American Fisheries Society*, **147** (3), 566–587. <https://doi.org/10.1002/tafs.10059>
86. Redmond, M.D., F. Forcella, and N.N. Barger, 2012: Declines in pinyon pine cone production associated with regional warming. *Ecosphere*, **3** (12), 1–14. <https://doi.org/10.1890/es12-00306.1>
87. Voggeser, G., K. Lynn, J. Daigle, F.K. Lake, and D. Ranco, 2013: Cultural impacts to tribes from climate change influences on forests. *Climatic Change*, **120** (3), 615–626. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0733-4>
88. Fish and Wildlife Service, 2022: Endangered and threatened wildlife and plants; threatened species status with section 4(d) rule for whitebark pine (*Pinus albicaulis*). *Federal Register*, **87** (240), 76882–76917. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-12-15/pdf/2022-27087.pdf>
89. Lynn, K., J. Daigle, J. Hoffman, F. Lake, N. Michelle, D. Ranco, C. Viles, G. Voggeser, and P. Williams, 2014: Ch. 4. The impacts of climate change on tribal traditional foods. In: *Climate Change and Indigenous Peoples in the United States: Impacts, Experiences and Actions*. Maldonado, J.K., B. Colombi, and R. Pandya, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 37–48. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05266-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05266-3_4)
90. Mucioki, M., J. Sowerwine, D. Sarna-Wojcicki, F.K. Lake, and S. Bourque, 2021: Conceptualizing Indigenous Cultural Ecosystem Services (ICES) and benefits under changing climate conditions in the Klamath River Basin and their implications for land management and governance. *Journal of Ethnobiology*, **41** (3), 313–330. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-41.3.313>
91. STACCWG, 2021: The Status of Tribes and Climate Change Report. Marks-Marino, D., Ed. Northern Arizona University, Institute for Tribal Environmental Professionals, Flagstaff, AZ. <http://nau.edu/stacc2021>
92. Askew, A.E. and J.M. Bowker, 2018: Impacts of climate change on outdoor recreation participation: Outlook to 2060. *The Journal of Park and Recreation Administration*, **36** (2), 97–120. <https://doi.org/10.18666/jpra-2018-v36-i2-8316>
93. Miller, A.B., P.L. Winter, J.J. Sánchez, D.L. Peterson, and J.W. Smith, 2022: Climate change and recreation in the western United States: Effects and opportunities for adaptation. *Journal of Forestry*, **120** (4), 453–472. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvab072>
94. Wang, D., D. Guan, S. Zhu, M.M. Kinnon, G. Geng, Q. Zhang, H. Zheng, T. Lei, S. Shao, P. Gong, and S.J. Davis, 2021: Economic footprint of California wildfires in 2018. *Nature Sustainability*, **4** (3), 252–260. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00646-7>
95. EPA, 2021: Comparative Assessment of the Impacts of Prescribed Fire Versus Wildfire (CAIF): A Case Study in the Western U.S. EPA/600/R-21/197. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=352824>
96. Jones, C.G., A.G. Rappold, J. Vargo, W.E. Cascio, M. Kharrazi, B. McNally, and S. Hoshiko, 2020: Out-of-hospital cardiac arrests and wildfire-related particulate matter during 2015–2017 California wildfires. *Journal of the American Heart Association*, **9** (8), e014125. <https://doi.org/10.1161/jaha.119.014125>
97. Boaggio, K., S.D. LeDuc, R.B. Rice, P.F. Duffney, K.M. Foley, A.L. Holder, S. McDow, and C.P. Weaver, 2022: Beyond particulate matter mass: Heightened levels of lead and other pollutants associated with destructive fire events in California. *Environmental Science & Technology*, **56** (20), 14272–14283. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02099>

98. Proctor, C.R., J. Lee, D. Yu, A.D. Shah, and A.J. Whelton, 2020: Wildfire caused widespread drinking water distribution network contamination. *AWWA Water Science*, **2** (4), e1183. <https://doi.org/10.1002/aws2.1183>
99. Nadeau, M.S., N.J. DeCesare, D.G. Brimeyer, E.J. Bergman, R.B. Harris, K.R. Hersey, K.K. Huebner, P.E. Matthews, and T.P. Thomas, 2017: Status and trends of moose populations and hunting opportunity in the western United States. *Alces: A Journal Devoted to the Biology and Management of Moose*, **53**, 99–112. <https://alcesjournal.org/index.php/alces/article/view/182>
100. Cohen, J., C.E. Blinn, K.J. Boyle, T.P. Holmes, and K. Moeltner, 2016: Hedonic valuation with translating amenities: Mountain pine beetles and host trees in the Colorado Front Range. *Environmental and Resource Economics*, **63** (3), 613–642. <https://doi.org/10.1007/s10640-014-9856-y>
101. Marcano-Vega, H., 2020: U.S. Virgin Islands Forests, 2014. Resour. Bull. SRS 227. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 54 pp. <https://doi.org/10.2737/srs-rb-227>
102. Lugo, A.E., J.E. Smith, K.M. Potter, H. Marcano Vega, and C.M. Kurtz, 2022: The Contribution of Nonnative Tree Species to the Structure and Composition of Forests in the Conterminous United States in Comparison with Tropical Islands in the Pacific and Caribbean. Gen. Tech. Rep. IITF-54. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry, Río Piedras, PR, 81 pp. <https://doi.org/10.2737/iitf-gtr-54>
103. Burke, M., A. Driscoll, S. Heft-Neal, J. Xue, J. Burney, and M. Wara, 2021: The changing risk and burden of wildfire in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (2), e2011048118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011048118>
104. Maxwell, S.L., N. Butt, M. Maron, C.A. McAlpine, S. Chapman, A. Ullmann, D.B. Segan, and J.E.M. Watson, 2019: Conservation implications of ecological responses to extreme weather and climate events. *Diversity and Distributions*, **25** (4), 613–625. <https://doi.org/10.1111/ddi.12878>
105. Halsch, C.A., A.M. Shapiro, J.A. Fordyce, C.C. Nice, J.H. Thorne, D.P. Waetjen, and M.L. Forister, 2021: Insects and recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (2), e2002543117. <https://doi.org/10.1073/pnas.2002543117>
106. 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>
107. Reed, K.A., A.M. Stansfield, M.F. Wehner, and C.M. Zarzycki, 2020: Forecasted attribution of the human influence on Hurricane Florence. *Science Advances*, **6** (1), 9253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9253>
108. Trenberth, K.E., L. Cheng, P. Jacobs, Y. Zhang, and J. Fasullo, 2018: Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation. *Earth's Future*, **6** (5), 730–744. <https://doi.org/10.1029/2018ef000825>
109. Sobel, A.H., A.A. Wing, S.J. Camargo, C.M. Patricola, G.A. Vecchi, C.-Y. Lee, and M.K. Tippett, 2021: Tropical cyclone frequency. *Earth's Future*, **9** (12), e2021EF002275. <https://doi.org/10.1029/2021ef002275>
110. Brown, D.R., T.W. Sherry, and J. Harris, 2011: Hurricane Katrina impacts the breeding bird community in a bottomland hardwood forest of the Pearl River Basin, Louisiana. *Forest Ecology and Management*, **261** (1), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.038>
111. Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes, 2011: A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333** (6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
112. Domke, G., C.A. Williams, R. Birdsey, J. Coulston, A. Finzi, C. Gough, B. Haight, J. Hicke, M. Janowiak, B.d. Jong, W.A. Kurz, M. Lucash, S. Ogle, M. Olguín-Álvarez, Y. Pan, M. Skutsch, C. Smyth, C. Swanston, P. Templer, D. Wear, and C.W. Woodall, 2018: Ch. 9. Forests. In: *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. Cavallaro, N., G. Shrestha, R. Birdsey, M.A. Mayes, R.G. Najjar, S.C. Reed, P. Romero-Lankao, and Z. Zhu, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 365–398. <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch9>
113. Harris, N.L., S.C. Hagen, S.S. Saatchi, T.R.H. Pearson, C.W. Woodall, G.M. Domke, B.H. Braswell, B.F. Walters, S. Brown, W. Salas, A. Fore, and Y. Yu, 2016: Attribution of net carbon change by disturbance type across forest lands of the conterminous United States. *Carbon Balance and Management*, **11** (1), 24. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0066-5>



114. Quirion, B.R., G.M. Domke, B.F. Walters, G.M. Lovett, J.E. Fargione, L. Greenwood, K. Serbesoff-King, J.M. Randall, and S. Fei, 2021: Insect and disease disturbances correlate with reduced carbon sequestration in forests of the contiguous United States. *Frontiers in Forests and Global Change*, **4**, 716582. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.716582>
115. Sleeter, B.M., L. Frid, B. Rayfield, C. Daniel, Z. Zhu, and D.C. Marvin, 2022: Operational assessment tool for forest carbon dynamics for the United States: A new spatially explicit approach linking the LUCAS and CBM-CFS3 models. *Carbon Balance and Management*, **17** (1), 1. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00201-1>
116. Zhou, Q., G. Xian, J. Horton, D. Wellington, G. Domke, R. Auch, C. Li, and Z. Zhu, 2022: Tree regrowth duration map from LCMAP collection 1.0 land cover products in the conterminous United States, 1985–2017. *GIScience & Remote Sensing*, **59** (1), 959–974. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2083790>
117. Law, B.E., T.W. Hudiburg, L.T. Berner, J.J. Kent, P.C. Buotte, and M.E. Harmon, 2018: Land use strategies to mitigate climate change in carbon dense temperate forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115** (14), 3663–3668. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720064115>
118. Fitts, L.A., M.B. Russell, G.M. Domke, and J.K. Knight, 2021: Modeling land use change and forest carbon stock changes in temperate forests in the United States. *Carbon Balance and Management*, **16** (1), 20. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00183-6>
119. Ameray, A., Y. Bergeron, O. Valeria, M. Montoro Girona, and X. Cavard, 2021: Forest carbon management: A review of silvicultural practices and management strategies across boreal, temperate and tropical forests. *Current Forestry Reports*, **7** (4), 245–266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
120. Law, B.E., W.R. Moomaw, T.W. Hudiburg, W.H. Schlesinger, J.D. Sterman, and G.M. Woodwell, 2022: Creating strategic reserves to protect forest carbon and reduce biodiversity losses in the United States. *Land*, **11** (5). <https://doi.org/10.3390/land11050721>
121. Littlefield, C.E. and A.W. D'Amato, 2022: Identifying trade-offs and opportunities for forest carbon and wildlife using a climate change adaptation lens. *Conservation Science and Practice*, **4** (4), e12631. <https://doi.org/10.1111/csp2.12631>
122. Ontl, T.A., M.K. Janowiak, C.W. Swanston, J. Daley, S. Handler, M. Cornett, S. Hagenbuch, C. Handrick, L. McCarthy, and N. Patch, 2020: Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. *Journal of Forestry*, **118** (1), 86–101. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062>
123. Cohen, E., G. Sun, L. Zhang, P. Caldwell, and S. Krieger, 2017: Quantifying the Role of Forested Lands in Providing Surface Drinking Water Supply for Puerto Rico. Gen. Tech. Rep. SRS-197-Addendum. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 20 pp. <https://www.fs.usda.gov/research/treearch/54732>
124. Liu, N., G.R. Dobbs, P.V. Caldwell, C.F. Miniati, G. Sun, K. Duan, S.A.C. Nelson, P.V. Bolstad, and C.P. Carlson, 2022: Inter-basin transfers extend the benefits of water from forests to population centers across the conterminous U.S. *Water Resources Research*, **58** (5), e2021WR031537. <https://doi.org/10.1029/2021wr031537>
125. Mote, P.W., S. Li, D.P. Lettenmaier, M. Xiao, and R. Engel, 2018: Dramatic declines in snowpack in the western US. *Npj Climate and Atmospheric Science*, **1** (1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
126. Williams, A.P., B.I. Cook, and J.E. Smerdon, 2022: Rapid intensification of the emerging southwestern North American megadrought in 2020–2021. *Nature Climate Change*, **12** (3), 232–234. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01290-z>
127. Peterson, T.C., R.R. Heim, R. Hirsch, D.P. Kaiser, H. Brooks, N.S. Diffenbaugh, R.M. Dole, J.P. Giovannetone, K. Guirguis, T.R. Karl, R.W. Katz, K. Kunkel, D. Lettenmaier, G.J. McCabe, C.J. Paciorek, K.R. Ryberg, S. Schubert, V.B.S. Silva, B.C. Stewart, A.V. Vecchia, G. Villarini, R.S. Vose, J. Walsh, M. Wehner, D. Wolock, K. Wolter, C.A. Woodhouse, and D. Wuebbles, 2013: Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94** (6), 821–834. <https://doi.org/10.1175/bams-d-12-00066.1>
128. Yochum, S.E., J.A. Scott, and D.H. Levinson, 2019: Methods for assessing expected flood potential and variability: Southern Rocky Mountains region. *Water Resources Research*, **55** (8), 6392–6416. <https://doi.org/10.1029/2018wr024604>

129. Clifton, C.F., K.T. Day, C.H. Luce, G.E. Grant, M. Safeeq, J.E. Halofsky, and B.P. Staab, 2018: Effects of climate change on hydrology and water resources in the Blue Mountains, Oregon, USA. *Climate Services*, **10**, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.03.001>
130. Hamlet, A.F., M.M. Elsner, G.S. Mauger, S.-Y. Lee, I. Tohver, and R.A. Norheim, 2013: An overview of the Columbia Basin climate change scenarios project: Approach, methods, and summary of key results. *Atmosphere–Ocean*, **51** (4), 392–415. <https://doi.org/10.1080/07055900.2013.819555>
131. Ren, J., J.C. Adam, J.A. Hicke, E.J. Hanan, C.L. Tague, M. Liu, C.A. Kolden, and J.T. Abatzoglou, 2021: How does water yield respond to mountain pine beetle infestation in a semiarid forest? *Hydrology and Earth System Sciences*, **25** (9), 4681–4699. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4681-2021>
132. Rust, A.J., S. Saxe, J. McCray, C.C. Rhoades, and T.S. Hogue, 2019: Evaluating the factors responsible for post-fire water quality response in forests of the western USA. *International Journal of Wildland Fire*, **28** (10), 769–784. <https://doi.org/10.1071/wf18191>
133. Sankey, J.B., J. Kreitler, T.J. Hawbaker, J.L. McVay, M.E. Miller, E.R. Mueller, N.M. Vaillant, S.E. Lowe, and T.T. Sankey, 2017: Climate, wildfire, and erosion ensemble foretells more sediment in western USA watersheds. *Geophysical Research Letters*, **44** (17), 8884–8892. <https://doi.org/10.1002/2017gl073979>
134. Rust, A.J., T.S. Hogue, S. Saxe, and J. McCray, 2018: Post-fire water-quality response in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, **27** (3), 203–216. <https://doi.org/10.1071/wf17115>
135. Pennino, M.J., S.G. Leibowitz, J.E. Compton, M.T. Beyene, and S.D. LeDuc, 2022: Wildfires can increase regulated nitrate, arsenic, and disinfection byproduct violations and concentrations in public drinking water supplies. *Science of The Total Environment*, **804** (15), 149890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149890>
136. Rumsey, C.A., M.P. Miller, and G.A. Sexstone, 2020: Relating hydroclimatic change to streamflow, baseflow, and hydrologic partitioning in the Upper Rio Grande Basin, 1980 to 2015. *Journal of Hydrology*, **584**, 124715. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124715>
137. Crozier, L.G., J.E. Siegel, L.E. Wiesebron, E.M. Trujillo, B.J. Burke, B.P. Sandford, and D.L. Widener, 2020: Snake River sockeye and Chinook salmon in a changing climate: Implications for upstream migration survival during recent extreme and future climates. *PLoS ONE*, **15** (9), e0238886. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238886>
138. McDonnell, T.C., M.R. Sloat, T.J. Sullivan, C.A. Dolloff, P.F. Hessburg, N.A. Povak, W.A. Jackson, and C. Sams, 2015: Downstream warming and headwater acidity may diminish coldwater habitat in southern Appalachian mountain streams. *PLoS ONE*, **10** (8), e0134757. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134757>
139. Ruhí, A., J.D. Olden, and J.L. Sabo, 2016: Declining streamflow induces collapse and replacement of native fish in the American Southwest. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **14** (9), 465–472. <https://doi.org/10.1002/fee.1424>
140. Littell, J.S., S.A. McAfee, and G.D. Hayward, 2018: Alaska snowpack response to climate change: Statewide snowfall equivalent and snowpack water scenarios. *Water*, **10** (5), 668. <https://doi.org/10.3390/w10050668>
141. Littell, J.S., J.H. Reynolds, K.K. Bartz, S.A. McAfee, and G. Hayward, 2020: So goes the snow: Alaska snowpack changes and impacts on Pacific salmon in a warming climate (U.S. National Park Service). *Alaska Park Science*, **19** (1), 62–75. <https://www.nps.gov/articles/aps-19-1-10.htm>
142. Nash, C.S., G.E. Grant, S. Charnley, J.B. Dunham, H. Gosnell, M.B. Hausner, D.S. Pilliod, and J.D. Taylor, 2021: Great expectations: Deconstructing the process pathways underlying beaver-related restoration. *BioScience*, **71** (3), 249–267. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa165>
143. Stevenson, J.R., J.B. Dunham, S.M. Wondzell, and J. Taylor, 2022: Dammed water quality—Longitudinal stream responses below beaver ponds in the Umpqua River Basin, Oregon. *Ecohydrology*, **15** (4), e2430. <https://doi.org/10.1002/eco.2430>
144. Wondzell, S.M., M. Diabat, and R. Haggerty, 2019: What matters most: Are future stream temperatures more sensitive to changing air temperatures, discharge, or riparian vegetation? *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **55** (1), 116–132. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12707>
145. Stephens, S.L., J.D. McIver, R.E. Boerner, C.J. Fettig, J.B. Fontaine, B.R. Hartsough, P.L. Kennedy, and D.W. Schwilk, 2012: The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States. *BioScience*, **62** (6), 549–560. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.6>

146. Stephens, S.L., A.L. Westerling, M.D. Hurteau, M.Z. Peery, C.A. Schultz, and S. Thompson, 2020: Fire and climate change: Conserving seasonally dry forests is still possible. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (6), 354–360. <https://doi.org/10.1002/fee.2218>
147. Peterson, D.L. and J.E. Halofsky, 2018: Adapting to the effects of climate change on natural resources in the Blue Mountains, USA. *Climate Services*, **10**, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.005>
148. Halofsky, J., D. Peterson, K. Metlen, M. Myer, and V. Sample, 2016: Developing and implementing climate change adaptation options in forest ecosystems: A case study in southwestern Oregon, USA. *Forests*, **7** (11), 268. <https://doi.org/10.3390/f7110268>
149. Timberlake, T.J. and C.A. Schultz, 2019: Climate change vulnerability assessment for forest management: The case of the U.S. Forest Service. *Forests*, **10** (11), 1030. <https://doi.org/10.3390/f10111030>
150. Ontl, T.A., C. Swanston, L.A. Brandt, P.R. Butler, A.W. D'Amato, S.D. Handler, M.K. Janowiak, and P.D. Shannon, 2018: Adaptation pathways: Ecoregion and land ownership influences on climate adaptation decision-making in forest management. *Climatic Change*, **146** (1), 75–88. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1983-3>
151. PADEP, 2021: Pennsylvania Climate Action Plan 2021. Pennsylvania Department of Environmental Protection, Harrisburg, PA. <https://www.dep.pa.gov/citizens/climate/pages/pa-climate-action-plan.aspx>
152. Fischer, A.P., 2019: Adapting and coping with climate change in temperate forests. *Global Environmental Change*, **54**, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.011>
153. ITEP, 2021: Tribal Climate Change Assessments and Adaptation Plans. Institute for Tribal Environmental Professionals, 10 pp. [http://www7.nau.edu/itep/main/tcc/docs/resources/9\\_tribalccassessmentsadaptationplans\\_08\\_27\\_21.pdf](http://www7.nau.edu/itep/main/tcc/docs/resources/9_tribalccassessmentsadaptationplans_08_27_21.pdf)
154. Adaptation Partners, 2023: The Climate Change Adaptation Library for the Western United States. Adaptation Partners. <http://adaptationpartners.org/library.php>
155. 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. Fisichelli, 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>
156. Sass, E.M., B.J. Butler, and M. Markowski-Lindsay, 2020: Distribution of Forest Ownerships across the Conterminous United States, 2017. Res. Map NRS-11. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, Madison, WI. <https://doi.org/10.2737/nrs-rmap-11>
157. Long, J.W., F.K. Lake, and R.W. Goode, 2021: The importance of Indigenous cultural burning in forested regions of the Pacific West, USA. *Forest Ecology and Management*, **500**, 119597. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119597>
158. Marks-Block, T., F.K. Lake, and L.M. Curran, 2019: Effects of understory fire management treatments on California hazelnut, an ecocultural resource of the Karuk and Yurok Indians in the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*, **450**, 117517. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117517>
159. WA DNR, 2020: 20-Year Forest Health Strategic Plan: Eastern Washington. Washington Department of Natural Resources. [https://www.dnr.wa.gov/publications/rp\\_forest\\_health\\_20\\_year\\_strategic\\_plan.pdf](https://www.dnr.wa.gov/publications/rp_forest_health_20_year_strategic_plan.pdf)
160. St.Clair, J.B., B.A. Richardson, N. Stevenson-Molnar, G.T. Howe, A.D. Bower, V.J. Erickson, B. Ward, D. Bachelet, F.F. Kilkenny, and T. Wang, 2022: Seedlot selection tool and climate-smart restoration tool: Web-based tools for sourcing seed adapted to future climates. *Ecosphere*, **13** (5), e4089. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4089>
161. NIACS, 2022: The Nature Conservancy: Restoring and Connecting Forests in Cuyahoga Valley National Park. Northern Institute of Applied Climate Science. <https://forestadaptation.org/adapt/demonstration-projects/nature-conservancy-restoring-and-connecting-forests-cuyahoga-valley>
162. NIACS, 2022: The Nature Conservancy: Setting Northern New York Forests on Climate-Adapted Trajectories by Improving Regeneration & Forest Structure. Northern Institute of Applied Climate Science. <https://forestadaptation.org/adapt/demonstration-projects/nature-conservancy-setting-northern-new-york-forests-climate-adapted>
163. Piana, M.R., C.C. Pregitzer, and R.A. Hallett, 2021: Advancing management of urban forested natural areas: Toward an urban silviculture? *Frontiers in Ecology and the Environment*, **19** (9), 526–535. <https://doi.org/10.1002/fee.2389>

164. Piana, M.R., R.A. Hallett, M.L. Johnson, N.F. Sonti, L.A. Brandt, M.F.J. Aronson, M. Ashton, M. Blaustein, D. Bloniarz, A.A. Bowers, M.E. Carr, V. D'Amico, L. Dewald, H. Dionne, D.A. Doroski, R.T. Fahey, H. Forgione, T. Forrest, J. Hale, E. Hansen, L. Hayden, S. Hines, J.M. Hoch, T. Ieatoka, S.B. Lerman, C. Murphy, E. Nagele, K. Nislow, D. Parker, C.C. Pregitzer, L. Rhodes, J. Schuler, A. Sherman, T. Trammell, B.M. Wienke, T. Witmer, T. Worthley, and I. Yesilonis, 2021: Climate adaptive silviculture for the city: Practitioners and researchers co-create a framework for studying urban oak-dominated mixed hardwood forests. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **9**, 750495. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.750495>
165. Pregitzer, C.C., S. Charlop-Powers, S. Bibbo, H.M. Forgione, B. Gunther, R.A. Hallett, and M.A. Bradford, 2019: A city-scale assessment reveals that native forest types and overstory species dominate New York City forests. *Ecological Applications*, **29** (1), e01819. <https://doi.org/10.1002/eap.1819>
166. Tribal Adaptation Menu Team, 2019: Dibaginjigaadeg Anishinaabe Ezhitwaad: A Tribal Climate Adaptation Menu. Great Lakes Indian Fish and Wildlife Commission, Odanah, WI, 54 pp. <https://forestadaptation.org/tribal-climate-adaptation-menu>
167. NIACS, 2022: Mark Twain National Forest: Red Bluff Recreation Area. Northern Institute of Applied Climate Science. <https://forestadaptation.org/adapt/demonstration-projects/mark-twain-national-forest-red-bluff-recreation-area>
168. Álvarez-Berrios, N.L., S.S. Wiener, K.A. McGinley, A.B. Lindsey, and W.A. Gould, 2021: Hurricane effects, mitigation, and preparedness in the Caribbean: Perspectives on high importance-low prevalence practices from agricultural advisors. *Journal of Emergency Management*, **19** (8), 135-155. <https://doi.org/10.5055/jem.0585>
169. Wiener, S.S., N.L. Álvarez-Berrios, and A.B. Lindsey, 2020: Opportunities and challenges for hurricane resilience on agricultural and forest land in the U.S. Southeast and Caribbean. *Sustainability*, **12** (4), 1364. <https://doi.org/10.3390/su12041364>
170. Knapp, E.E., A.A. Bernal, J.M. Kane, C.J. Fettig, and M.P. North, 2021: Variable thinning and prescribed fire influence tree mortality and growth during and after a severe drought. *Forest Ecology and Management*, **479**, 118595. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118595>
171. McCauley, L.A., J.B. Bradford, M.D. Robles, R.K. Shriver, T.J. Woolley, and C.A. Andrews, 2022: Landscape-scale forest restoration decreases vulnerability to drought mortality under climate change in southwest USA ponderosa forest. *Forest Ecology and Management*, **509**, 120088. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120088>
172. Hessburg, P.F., S.J. Prichard, R.K. Haggmann, N.A. Povak, and F.K. Lake, 2021: Wildfire and climate change adaptation of western North American forests: A case for intentional management. *Ecological Applications*, **31** (8), e02432. <https://doi.org/10.1002/eap.2432>
173. Lake, F.K., 2021: Indigenous fire stewardship: Federal/Tribal partnerships for wildland fire research and management. *Fire Management Today*, **79** (1), 30-39. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/62060>
174. Messier, C., J. Bauhus, F. Doyon, F. Maure, R. Sousa-Silva, P. Nolet, M. Mina, N. Aquilué, M.-J. Fortin, and K. Puettmann, 2019: The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, **6** (1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
175. Grossiord, C., 2020: Having the right neighbors: How tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytologist*, **228** (1), 42-49. <https://doi.org/10.1111/nph.15667>
176. Berrouet, L.M., J. Machado, and C. Villegas-Palacio, 2018: Vulnerability of socio-ecological systems: A conceptual Framework. *Ecological Indicators*, **84**, 632-647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.051>
177. Olander, L., K. Warnell, T. Warziniack, Z. Ghali, C. Miller, and C. Neelan, 2021: Exploring the use of ecosystem services conceptual models to account for the benefits of public lands: An example from national forest planning in the United States. *Forests*, **12** (3), 267. <https://doi.org/10.3390/f12030267>
178. Schelhas, J., S. Hitchner, C. Johnson Gaither, R. Fraser, V. Jennings, and A. Diop, 2017: Engaging African American landowners in sustainable forest management. *Journal of Forestry*, **115** (1), 26-33. <https://doi.org/10.5849/jof.15-116>
179. Kramer, A.L., J. Liu, L. Li, R. Connolly, M. Barbato, and Y. Zhu, 2023: Environmental justice analysis of wildfire-related PM<sub>2.5</sub> exposure using low-cost sensors in California. *Science of The Total Environment*, **856**, 159218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159218>
180. Thomas, A., J. Sánchez, and D. Flores, 2022: A review of trends and knowledge gaps in Latinx outdoor recreation on federal and state public lands. *Journal of Park and Recreation Administration*, **40** (1). <https://doi.org/10.18666/jpra-2021-11064>



181. Baumflek, M., K.-A. Kassam, C. Ginger, and M.R. Emery, 2021: Incorporating biocultural approaches in forest management: Insights from a case study of Indigenous plant stewardship in Maine, USA and New Brunswick, Canada. *Society & Natural Resources*, **34** (9), 1155–1173. <https://doi.org/10.1080/08941920.2021.1944411>
182. 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>
183. Yazzie, J.O., P.Z. Fulé, Y.-S. Kim, and A. Sánchez Meador, 2019: Diné kinship as a framework for conserving native tree species in climate change. *Ecological Applications*, **29** (6), e01944. <https://doi.org/10.1002/eap.1944>
184. Sáenz-Romero, C., G. Neill, S.N. Aitken, and R. Lindig-Cisneros, 2021: Assisted migration field tests in Canada and Mexico: Lessons, limitations, and challenges. *Forests*, **12** (1), 9. <https://doi.org/10.3390/fl2010009>
185. Leech, S.M., P.L. Almuedo, and G. O'Neill, 2011: Assisted migration: Adapting forest management to a changing climate. *Journal of Ecosystems and Management*, **12** (3). <https://doi.org/10.22230/jem.2011v12n3a91>
186. Pérez, I., J.D. Anadón, M. Díaz, G.G. Nicola, J.L. Tella, and A. Giménez, 2012: What is wrong with current translocations? A review and a decision-making proposal. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **10** (9), 494–501. <https://doi.org/10.1890/110175>
187. Karasov-Olson, A., M.W. Schwartz, J.D. Olden, S. Skikne, J.J. Hellman, S. Allen, C. Brigham, D. Buttke, D.J. Lawrence, A.J. Miller-Rushing, J.T. Morisette, G.W. Schuurman, M. Trammell, and C. Hawkins-Hoffma, 2021: Ecological Risk Assessment of Managed Relocation as a Climate Change Adaptation Strategy. Natural Resource Report. NPS/NRSS/CCRP/NRR–2021/2241. U.S. Department of the Interior, National Park Service, Fort Collins, CO. <https://doi.org/10.36967/nrr-2284919>.
188. Fargione, J., D.L. Haase, O.T. Burney, O.A. Kildisheva, G. Edge, S.C. Cook-Patton, T. Chapman, A. Rempel, M.D. Hurteau, K.T. Davis, S. Dobrowski, S. Enebak, R. De La Torre, A.A.R. Bhuta, F. Cubbage, B. Kittler, D. Zhang, and R.W. Guldin, 2021: Challenges to the reforestation pipeline in the United States. *Frontiers in Forests and Global Change*, **4**, 629198. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.629198>
189. Chambwera, M., G. Heal, C. Dubeux, S. Hallegatte, L. Leclerc, A. Markandya, B.A. McCarl, R. Mechler, and J.E. Neumann, 2014: Ch. 17. Economics of adaptation. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 945–977. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
190. UNECE, 2021: Forest Sector Outlook Study, 2020–2040. ECE/TIM/SP/51. United Nations Economic Commission for Europe and the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Geneva, Switzerland, 103 pp. [https://unece.org/sites/default/files/2022-05/unece-fao-sp-51-main-report-forest-sector-outlook\\_0.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-05/unece-fao-sp-51-main-report-forest-sector-outlook_0.pdf)
191. Andersson, E. and E.C.H. Keskitalo, 2018: Adaptation to climate change? Why business-as-usual remains the logical choice in Swedish forestry. *Global Environmental Change*, **48**, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.004>
192. Anderson, S., T.L. Anderson, A.C. Hill, M.E. Kahn, H. Kunreuther, G.D. Libecap, H. Mantri-Pragada, P. Mérel, A.J. Plantinga, V. Kerry Smith, 2019: The critical role of markets in climate change adaptation. *Climate Change Economics*, **10** (1), 1950003. <https://doi.org/10.1142/s2010007819500039>
193. Nordhaus, W., 2019: Climate change: The ultimate challenge for economics. *American Economic Review*, **109** (6), 1991–2014. <https://doi.org/10.1257/aer.109.6.1991>
194. Hashida, Y., J. Withey, D.J. Lewis, T. Newman, and J.D. Kline, 2020: Anticipating changes in wildlife habitat induced by private forest owners' adaptation to climate change and carbon policy. *PLoS ONE*, **15** (4), e0230525. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230525>
195. Amacher, G., A.S. Malik, and R.G. Haight, 2006: Reducing social losses from forest fires. *Land Economics*, **82** (3), 367–383. <https://doi.org/10.3368/le.82.3.367>
196. Scarlett, L. and M. McKinney, 2016: Connecting people and places: The emerging role of network governance in large landscape conservation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **14** (3), 116–125. <https://doi.org/10.1002/fee.1247>

197. Wyborn, C., A. Datta, J. Montana, M. Ryan, P. Leith, B. Chaffin, C. Miller, and L. van Kerkhoff, 2019: Co-producing sustainability: Reordering the governance of science, policy, and practice. *Annual Review of Environment and Resources*, **44** (1), 319–346. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033103>
198. Coop, J.D., S.A. Parks, C.S. Stevens-Rumann, S.D. Crausbay, P.E. Higuera, M.D. Hurteau, A. Tepley, E. Whitman, T. Assal, B.M. Collins, K.T. Davis, S. Dobrowski, D.A. Falk, P.J. Fornwalt, P.Z. Fulé, B.J. Harvey, V.R. Kane, C.E. Littlefield, E.Q. Margolis, M. North, M.-A. Parisien, S. Prichard, and K.C. Rodman, 2020: Wildfire-driven forest conversion in western North American landscapes. *BioScience*, **70** (8), 659–673. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa061>
199. 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>
200. Littell, J.S., D. McKenzie, D.L. Peterson, and A.L. Westerling, 2009: Climate and wildfire area burned in western U.S. ecoregions, 1916–2003. *Ecological Applications*, **19** (4), 1003–1021. <https://doi.org/10.1890/07-1183.1>
201. Abatzoglou, J.T. and C.A. Kolden, 2013: Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, **22** (7), 1003–1020. <https://doi.org/10.1071/wf13019>
202. Barbero, R., J. Abatzoglou, N. Larkin, C. Kolden, and B. Stocks, 2015: Climate change presents increased potential for very large fires in the contiguous United States. *International Journal of Wildland Fire*, **24** (7), 892–899. <https://doi.org/10.1071/wf15083>
203. Kitzberger, T., D.A. Falk, A.L. Westerling, and T.W. Swetnam, 2017: Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America. *PLoS ONE*, **12** (12), e0188486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188486>
204. Fettig, C.J., 2019: Socioecological impacts of the western pine beetle outbreak in Southern California: Lessons for the future. *Journal of Forestry*, **117** (2), 138–143. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvy029>
205. Berner, L.T. and S.J. Goetz, 2022: Satellite observations document trends consistent with a boreal forest biome shift. *Global Change Biology*, **28** (10), 3275–3292. <https://doi.org/10.1111/gcb.16121>
206. Nigro, K.M., M.E. Rocca, M.A. Battaglia, J.D. Coop, and M.D. Redmond, 2022: Wildfire catalyzes upward range expansion of trembling aspen in southern Rocky Mountain beetle-killed forests. *Journal of Biogeography*, **49** (1), 201–214. <https://doi.org/10.1111/jbi.14302>
207. Sharma, S., R. Andrus, Y. Bergeron, M. Bogdziewicz, D.C. Bragg, D. Brockway, N.L. Cleavitt, B. Courbaud, A.J. Das, M. Dietze, T.J. Fahey, J.F. Franklin, G.S. Gilbert, C.H. Greenberg, Q. Guo, J.H.R. Lambers, I. Ibanez, J.F. Johnstone, C.L. Kilner, J.M.H. Knops, W.D. Koenig, G. Kunstler, J.M. LaMontagne, D. Macias, E. Moran, J.A. Myers, R. Parmenter, I.S. Pearse, R. Poulton-Kamakura, M.D. Redmond, C.D. Reid, K.C. Rodman, C.L. Scher, W.H. Schlesinger, M.A. Steele, N.L. Stephenson, J.J. Swenson, M. Swift, T.T. Veblen, A.V. Whipple, T.G. Whitham, A.P. Wion, C.W. Woodall, R. Zlotin, and J.S. Clark, 2022: North American tree migration paced by climate in the West, lagging in the East. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (3), e2116691118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2116691118>
208. De Frenne, P., J. Lenoir, M. Luoto, B.R. Scheffers, F. Zellweger, J. Aalto, M.B. Ashcroft, D.M. Christiansen, G. Decocq, K. De Pauw, S. Govaert, C. Greiser, E. Gril, A. Hampe, T. Jucker, D.H. Klimes, I.A. Koelemeijer, J.J. Lembrechts, R. Marrec, C. Meeussen, J. Ogée, V. Tyystjärvi, P. Vangansbeke, and K. Hylander, 2021: Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, **27** (11), 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
209. Buchholz, R.R., M. Park, H.M. Worden, W. Tang, D.P. Edwards, B. Gaubert, M.N. Deeter, T. Sullivan, M. Ru, M. Chin, R.C. Levy, B. Zheng, and S. Magzamen, 2022: New seasonal pattern of pollution emerges from changing North American wildfires. *Nature Communications*, **13** (1), 2043. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29623-8>
210. McClure, C.D. and D.A. Jaffe, 2018: US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115** (31), 7901–7906. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804353115>
211. NIFC, 2022: Wildfires and Acres. National Interagency Fire Center. <https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires>

212. Ticktin, T., K. Kindscher, S. Souther, P.C. Weisberg, James L. Hummel, Susan, C. Mitchell, and S. Sanders, 2018: Ch. 3. Ecological dimensions of nontimber forest product harvest. In: *Assessment of Nontimber Forest Products in the United States Under Changing Conditions*. Chamberlain, J.L., M.R. Emery, and T. Patel-Weynand, Eds. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 60–81. <https://doi.org/10.2737/srs-gtr-232>
213. Lake, F.K., M.R. Emery, M.J. Baumflek, K.S. Friday, K. Kamelamela, L. Kruger, N. Grewe, J. Gilbert, and N.J. Reo, 2018: Ch. 4. Cultural dimensions of nontimber products. In: *Assessment of Nontimber Forest Products in the United States Under Changing Conditions*. Chamberlain, J.L., M.R. Emery, and T. Patel-Weynand, Eds. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 16. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/57298>
214. 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>
215. Wünschmann, A., A.G. Armien, E. Butler, M. Schrage, B. Stromberg, J.B. Bender, A.M. Firshman, and M. Carstensen, 2015: Necropsy findings in 62 opportunistically collected free-ranging moose (*Alces alces*) from Minnesota, USA (2003–13). *Journal of Wildlife Diseases*, **51** (1), 157–65. <https://doi.org/10.7589/2014-02-037>
216. Carstensen, M., E.C. Hildebrand, D. Plattner, M. Dexter, A. Wünschmann, and A. Armien, 2018: Causes of Non-hunting Mortality of Adult Moose in Minnesota, 2013–2017. Minnesota Department of Natural Resources. [https://files.dnr.state.mn.us/wildlife/research/studies/moose/moose\\_findings.pdf](https://files.dnr.state.mn.us/wildlife/research/studies/moose/moose_findings.pdf)
217. DelGuidice, G.D. and J.H. DelGuidice, 2022: 2022 Aerial Moose Survey. Minnesota Department of Natural Resources, 13 pp. <https://files.dnr.state.mn.us/wildlife/moose/moosesurvey.pdf?20220524-17>
218. Jones, H., P. Pekins, L. Kantar, I. Sidor, D. Ellingwood, A. Lichtenwalner, and M. O’Neal, 2019: Mortality assessment of moose (*Alces alces*) calves during successive years of winter tick (*Dermacentor albipictus*) epizootics in New Hampshire and Maine (USA). *Canadian Journal of Zoology*, **97** (1), 22–30. <https://doi.org/10.1139/cjz-2018-0140>
219. Smart, L.S., P.J. Taillie, B. Poulter, J. Vukomanovic, K.K. Singh, J.J. Swenson, H. Mitasova, J.W. Smith, and R.K. Meentemeyer, 2020: Aboveground carbon loss associated with the spread of ghost forests as sea levels rise. *Environmental Research Letters*, **15** (10), 104028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba136>
220. 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>
221. Bowker, J.M. and A. Askew, 2012: Ch. 8. U.S. outdoor recreation participation projections to 2060. In: *Outdoor Recreation Trends and Futures: A technical Document Supporting the Forest Service 2010 Resources Planning Act Assessment*. Cordell, H.K., Ed. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 105–124. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/42080>
222. Norström, A.V., C. Cvitanić, M.F. Löf, S. West, C. Wyborn, P. Balvanera, A.T. Bednarek, E.M. Bennett, R. Biggs, A. de Bremond, B.M. Campbell, J.G. Canadell, S.R. Carpenter, C. Folke, E.A. Fulton, O. Gaffney, S. Gelcich, J.-B. Jouffray, M. Leach, M. Le Tissier, B. Martín-López, E. Louder, M.-F. Loutre, A.M. Meadow, H. Nagendra, D. Payne, G.D. Peterson, B. Reyers, R. Scholes, C.I. Speranza, M. Spierenburg, M. Stafford-Smith, M. Tengö, S. van der Hel, I. van Putten, and H. Österblom, 2020: Principles for knowledge co-production in sustainability research. *Nature Sustainability*, **3** (3), 182–190. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0448-2>
223. Violle, C., M.-L. Navas, D. Vile, E. Kazakou, C. Fortunel, I. Hummel, and E. Garnier, 2007: Let the concept of trait be functional! *Oikos*, **116** (5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
224. Pretzsch, H., D.I. Forrester, and J. Bauhus, Eds., 2017: *Mixed-Species Forests: Ecology and Management*. Springer, Heidelberg, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>
225. Vernon, M.J., R.L. Sherriff, P. van Mantgem, and J.M. Kane, 2018: Thinning, tree-growth, and resistance to multi-year drought in a mixed-conifer forest of northern California. *Forest Ecology and Management*, **422**, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.043>
226. Andrews, C.M., A.W. D’Amato, S. Fraver, B. Palik, M.A. Battaglia, and J.B. Bradford, 2020: Low stand density moderates growth declines during hot droughts in semi-arid forests. *Journal of Applied Ecology*, **57** (6), 1089–1102. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13615>
227. Steckel, M., W.K. Moser, M. del Río, and H. Pretzsch, 2020: Implications of reduced stand density on tree growth and drought susceptibility: A study of three species under varying climate. *Forests*, **11** (6), 627. <https://doi.org/10.3390/f11060627>