

# Mitigación



# Capítulo 32. Mitigación

## Autores y colaboradores

### Autor principal de coordinación federal

**Rebecca S. Dodder**, US Environmental Protection Agency

### Autor principal del capítulo

**Steven J. Davis**, University of California, Irvine

### Autor principal del capítulo de la agencia

**David D. Turner**, NOAA Global Systems Laboratory

### Autores del capítulo

**Ines M. L. Azevedo**, Stanford University

**Morgan Bazilian**, Colorado School of Mines

**John Bistline**, Electric Power Research Institute

**Sanya Carley**, Indiana University

**Christopher T. M. Clack**, Vibrant Clean Energy LLC

**Joseph E. Fargione**, The Nature Conservancy

**Emily Grubert**, University of Notre Dame

**Jason Hill**, University of Minnesota

**Adrienne L. Hollis**, Hollis Environmental Consulting

**Alan Jenn**, University of California, Davis

**Ryan A. Jones**, Evolved Energy Research

**Eric Masanet**, University of California, Santa Barbara

**Erin N. Mayfield**, Dartmouth College

**Matteo Muratori**, National Renewable Energy Laboratory

**Wei Peng**, The Pennsylvania State University

**Brittany C. Sellers**, City of Orlando, Florida

### Contribuyentes técnicos

**Jacques de Chalendar**, Stanford University

**Julianne DeAngelo**, University of California, Irvine

**Huilin Luo**, The Pennsylvania State University

**Tyler H. Ruggles**, Carnegie Institution for Science

**Jaxon Z. Stuhr**, University of California, Santa Barbara

### Editor revisor

**Michael Westphal**, Pacific Northwest National Laboratory

### Arte de apertura de capítulo

**Katharine Cartwright**

### Cita recomendada

Davis, S.J., R.S. Dodder, D.D. Turner, I.M.L. Azevedo, M. Bazilian, J. Bistline, S. Carley, C.T.M. Clack, J.E. Fargione, E. Grubert, J. Hill, A.L. Hollis, A. Jenn, R.A. Jones, E. Masanet, E.N. Mayfield, M. Muratori, W. Peng, and B.C. Sellers, 2023: Cap. 32. Mitigación. 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.CH32.ES>

# Índice de Contenidos

## Introducción .....6

### Mensaje clave 32.1

## **Una mitigación con éxito significa llegar a cero emisiones netas .....6**

Metas de mitigación.....	6
Principales tendencias.....	8
Tendencias e impulsos específicos del sector.....	8
Emisiones del sector eléctrico .....	9
Emisiones del sector del transporte .....	10
Emisiones de edificios residenciales y comerciales.....	11
Emisiones del sector industrial .....	12
Emisiones relacionadas con la tierra .....	13

### Mensaje clave 32.2

## **Sabemos cómo reducir drásticamente las emisiones ..... 14**

Oportunidades establecidas para reducir las emisiones relacionadas con la energía.....	14
Oportunidades establecidas para reducir las emisiones relacionadas con la tierra .....	20

### Mensaje clave 32.3

## **Para alcanzar las emisiones netas cero hay que explorar otras opciones de mitigación .....22**

Posibles oportunidades para reducir las emisiones relacionadas con la energía.....	22
Recuadro 32.1 Hidrógeno .....	24
Recuadro 32.2. Eliminación de dióxido de carbono.....	26
Posibles oportunidades para reducir las emisiones relacionadas con la tierra .....	28

### Mensaje clave 32.4

## **La mitigación puede ser sostenible, sana y justa .....28**

Contaminación del aire .....	29
Emplazamiento y uso de la tierra .....	30
Uso del agua .....	31
Trabajo .....	33
Equidad energética y justicia medioambiental.....	34

### Mensaje clave 32.5

## **Gobiernos, organizaciones y particulares pueden actuar para reducir las emisiones.....38**

Recuadro 32.3. Caso de estudio de Orlando: Mitigación en la ciudad más visitada del país .....	44
--	----

<b>Cuentas trazables.....</b>	<b>45</b>
Descripción del proceso .....	45
Mensaje clave 32.1.....	45
Mensaje clave 32.2.....	46
Mensaje clave 32.3.....	47
Mensaje clave 32.4.....	48
Mensaje clave 32.5.....	49
<b>Referencias .....</b>	<b>50</b>

## Introducción

La mitigación se refiere a los esfuerzos para reducir las emisiones o eliminar el carbono de la atmósfera con la meta de evitar o reducir los efectos del cambio climático, que es diferente de la adaptación de los sistemas y las actividades a un clima que ha cambiado (Capítulo 31). Para cumplir las metas climáticas internacionales, las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) tendrían que llegar a cero alrededor del año 2050 (KM 32.1)<sup>1</sup>.

La mitigación es la respuesta más costo-efectiva al cambio climático, con grandes beneficios potenciales para las economías (Capítulo 19), la equidad social y económica (Capítulo 12), la salud humana (Capítulos 13, 14, 15), la seguridad alimentaria (Capítulo 6) y los ecosistemas (Capítulos 7, 8). Los estudios de modelación coinciden en que es factible una gran reducción a corto plazo de los gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) en Estados Unidos mediante mejora de la eficiencia energética, electrificación de los usos finales de la energía y generación de electricidad a partir de fuentes de energía no emisoras, como la solar y la eólica (KM 32.2). Sin embargo, la combinación óptima de tecnologías para alcanzar las emisiones netas cero aún no está clara, y se necesita más investigación y desarrollo para determinar las mejores opciones para el almacenamiento de energía de larga duración, fuentes de electricidad no emisoras y despachables (a veces denominadas firmes) y opciones netas cero para la aviación y el transporte de mercancías de larga distancia, así como la eliminación del dióxido de carbono (KM 32.3). Existen acciones para reducir inmediata y sustancialmente las emisiones, y pueden apoyarse en elecciones y decisiones individuales de múltiples partes interesadas (KM 32.5). Además, las desigualdades y las injusticias raciales, económicas, demográficas y geográficas están arraigadas en la infraestructura y los sistemas sociales existentes, y la mitigación influirá y se verá influenciada por factores de equidad, medioambientales y económicos (KM 32.4).

### Mensaje clave 32.1

#### Una mitigación con éxito significa llegar a cero emisiones netas

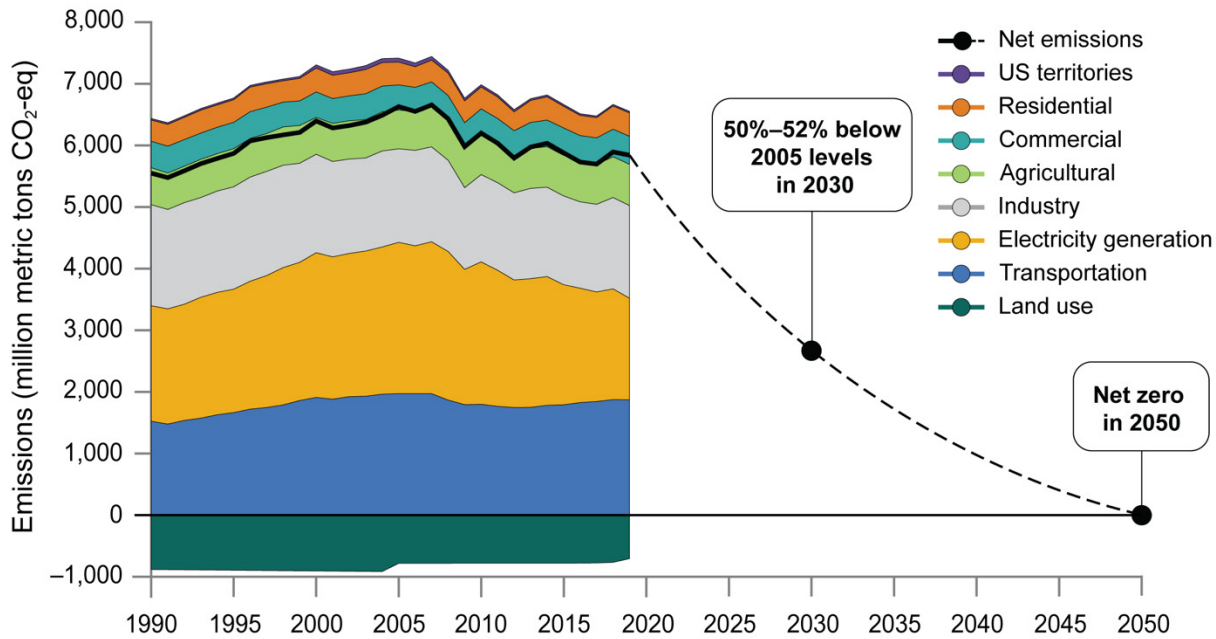
Las emisiones de gases de efecto invernadero en Estados Unidos disminuyeron un 12 % entre 2005 y 2019, debido sobre todo a la sustitución de la generación de electricidad a partir de carbón por generación a partir de gas natural y energías renovables (*confianza muy alta*). Sin embargo, las emisiones netas de gases de efecto invernadero de los EE. UU. siguen siendo considerables y tendrían que disminuir más del 6 % anual promedio hasta llegar a cero a mediados de siglo, para cumplir los actuales objetivos climáticos nacionales y las metas internacionales de temperatura (*confianza muy alta*).

### Metas de mitigación

Para alcanzar la meta del Acuerdo de París (un tratado internacional sobre el cambio climático) de limitar el calentamiento global muy por debajo de 2 °C por encima de los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar el calentamiento global a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales, las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> tienen que llegar a cero neto alrededor del año 2050 y seguir siendo cero neto o negativo neto después<sup>2</sup>. Así pues, las emisiones de CO<sub>2</sub> de los EE. UU. a mediados de siglo serían coherentes con las metas de París, aunque es posible una amplia gama de trayectorias basadas en consideraciones de equidad internacional, reparto de cargas, costos e hipótesis políticas<sup>3,4,5</sup>. Este capítulo aborda vías y opciones para mitigar las emisiones en los EE. UU. de todos los sectores de forma coherente con las metas climáticas nacionales e internacionales.

Como parte del Acuerdo de París, los países comunican sus contribuciones determinadas a nivel nacional (nationally determined contributions, NDC), es decir, los objetivos de reducción de emisiones que pretenden alcanzar. La última NDC comunicada por Estados Unidos a la Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) establece como objetivo para toda la economía la reducción de todas sus emisiones netas de GHG (no solo de CO<sub>2</sub>) entre el 50 % y el 52 % por debajo de los niveles de 2005 en 2030, o aproximadamente un -6 % anual a partir de 2022, lo que sitúa al país en la ruta para alcanzar la meta de llegar a cero emisiones netas de GHG a más tardar en 2050 (Figura 32.1)<sup>6</sup>. Además, 24 estados y Washington DC tienen sus propios objetivos de reducción (KM 32.5).

### Emisiones de gases de efecto invernadero de los EE. UU. por sectores con las metas de 2030 y 2050 añadidas



**Las emisiones en EE. UU. tendrán que disminuir rápidamente para alcanzar niveles acordados con los objetivos climáticos internacionales.**

**Figura 32.1.** La figura muestra las emisiones y sumideros anuales de gases de efecto invernadero de los EE. UU. de 2005 a 2019, así como los objetivos futuros para alcanzar la contribución determinada a nivel nacional de los EE. UU. en virtud del Acuerdo de París. Los territorios de los EE. UU. —incluidos Sãmoa Americana, la Mancomunidad de las Islas Marianas del Norte, Estados Federados de Micronesia, Guam, la República de las Islas Marshall y la República de Palaos— contribuyen con emisiones menores (no visibles) que no se desglosan por sectores. CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Adaptado de DOS y EOP 2021<sup>6</sup>.

## Principales tendencias

Entre 1990 y 2019, las emisiones de CO<sub>2</sub> y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) aumentaron aproximadamente un 3 % en cada caso. Las emisiones de gases fluorados aumentaron un 86 %, y las de metano (CH<sub>4</sub>) disminuyeron un 15 %<sup>7</sup>. Aunque el último inventario de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA) informa de las emisiones hasta 2021<sup>8</sup>, este capítulo se centra en las tendencias de las emisiones hasta 2019 porque la pandemia del COVID-19 provocó cambios sustanciales, pero en gran medida temporales, en las emisiones relacionadas con la energía en todo el mundo (consulte, p. ej., Davis *et al.* 2022<sup>9</sup>; Liu *et al.* 2020<sup>10</sup>). La EPA calcula que las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) de los GHG fueron de unos 6,600 millones de toneladas métricas (o gigatoneladas; Gt) en 2019, el 2 % más que en 1990<sup>7,11</sup>. Las fuentes de estas emisiones son principalmente la generación de electricidad, el transporte y la quema de combustibles en otros sectores (es decir, comercial, residencial e industrial), con contribuciones menores de la agricultura, los procesos industriales y los residuos (Figura 32.1). Los principales sumideros fueron los cambios en el uso de la tierra y, sobre todo, los bosques, que provocaron una absorción neta de 0.7 Gt de CO<sub>2</sub> en 2019. Las emisiones netas de GHG de todas las fuentes y sumideros fueron, por tanto, de 5.8 Gt de CO<sub>2</sub>-eq en 2019<sup>7,8,11</sup>.

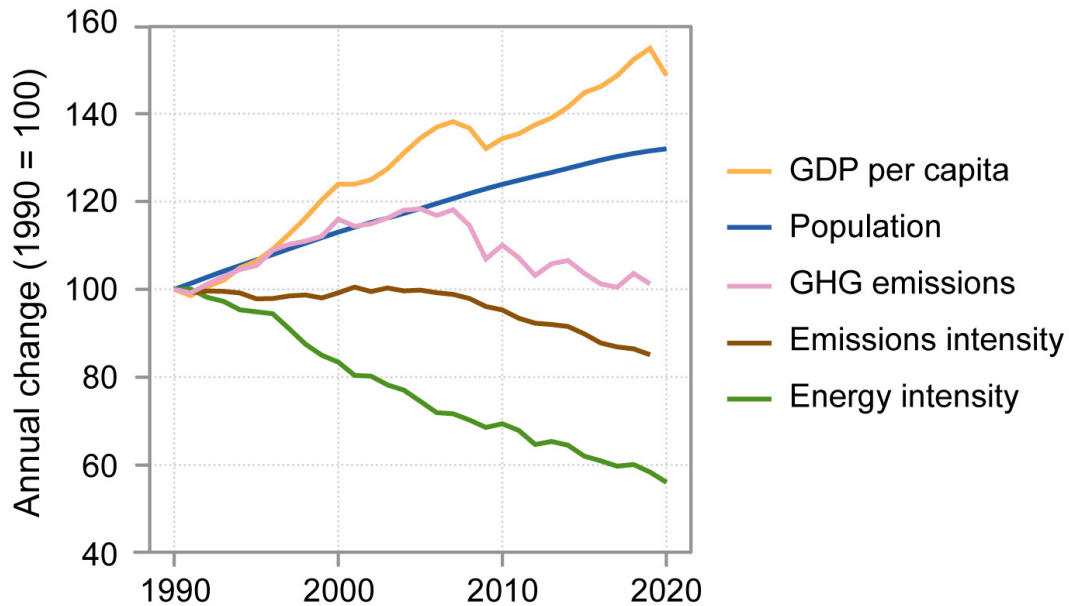
Entre 2005 y 2019, las emisiones de GHG de los EE. UU. disminuyeron un 12 %, principalmente debido a la reducción de las emisiones de la generación de electricidad. De hecho, desde 2017, la mayor parte de las emisiones de GHG procede del sector del transporte (Figura 32.1). Las estimaciones incluyen las emisiones producidas en todos los territorios de los EE. UU., como la EPA informa anualmente a la Secretaría de la UNFCCC. Las estimaciones independientes de otros organismos científicos e investigadores son similares, pero no idénticas<sup>12,13,14,15</sup>.

## Tendencias e impulsos específicos del sector

Entre 1990 y 2019, el crecimiento económico y demográfico ha contribuido a aumentar las emisiones de los EE. UU. relacionadas con la energía, pero se ha visto contrarrestado por reducciones tanto de la energía utilizada por dólar del Producto Interno Bruto (Gross Domestic Product, GDP) (o “intensidad energética de la actividad económica”) como de las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía utilizada (o “intensidad energética de las emisiones”)<sup>16</sup>. En particular, los descensos de las emisiones energéticas desde 2007 se vieron impulsados por una caída constante y sustancial de las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de energía consumida, desde un máximo de 59 millones de toneladas métricas (megatoneladas; Mt) de CO<sub>2</sub> por exajulio (10<sup>18</sup> julios) de energía consumida en 2007 a 51 Mt por exajulio en 2019 (Figura 32.2).



### Cambios en los impulsores de emisión de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) relacionados con la energía



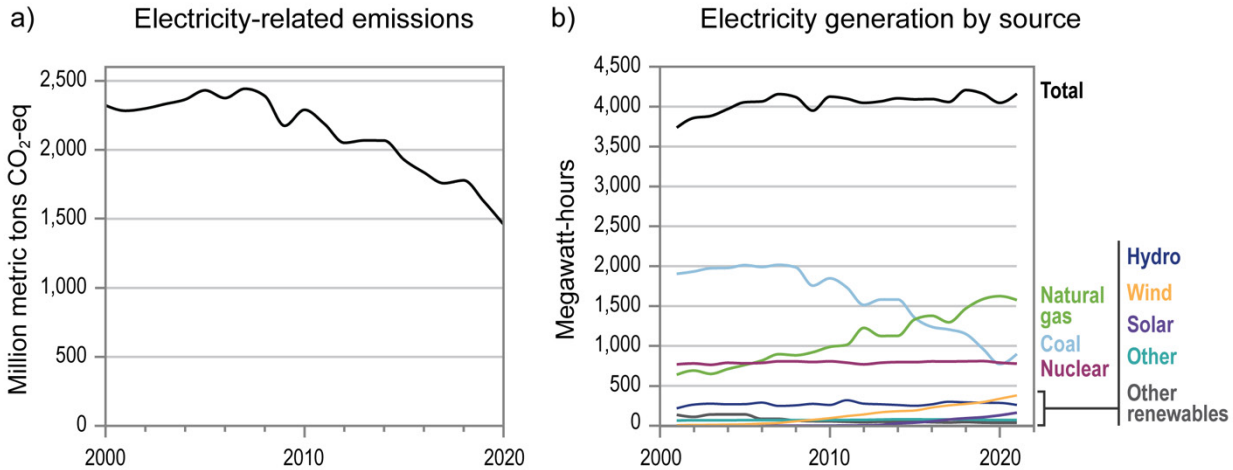
Las emisiones de gases de efecto invernadero de los EE. UU. han disminuido a pesar del aumento de la población y la actividad económica (medida por el GDP).

**Figura 32.2.** Las emisiones de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) relacionadas con la energía en Estados Unidos han disminuido desde 2007 (rosa) a pesar del aumento de la población (azul) y de la actividad económica medida por el GDP (naranja). Detrás de la tendencia decreciente se encuentran reducciones graduales en el uso de energía por dólar de PIB (intensidad energética, verde) y grandes descensos en las emisiones de GHG por unidad de energía producida (intensidad de emisiones, marrón). Créditos de la figura: Stanford University.

### Emisiones del sector eléctrico

Las emisiones de GHG del sector eléctrico en 2019 fueron de 1,629 Mt de CO<sub>2</sub>-eq, es decir, el 30 % de las emisiones relacionadas con la energía<sup>7</sup>. Los descensos de las emisiones relacionadas con la energía en los EE. UU. desde 2007 reflejan sobre todo cambios en el sector eléctrico, especialmente la retirada y el menor uso de centrales eléctricas de carbón y los correspondientes aumentos de electricidad de menor costo procedente de centrales eléctricas de gas natural (y, en menor medida, de tecnologías renovables; Figura 32.3b). Las emisiones en los EE. UU. procedentes de la generación de electricidad en 2019 fueron aproximadamente un 40 % inferiores a los niveles de 2005 (Figura 32.3a).

## Tendencias en la generación de electricidad por fuentes y emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas



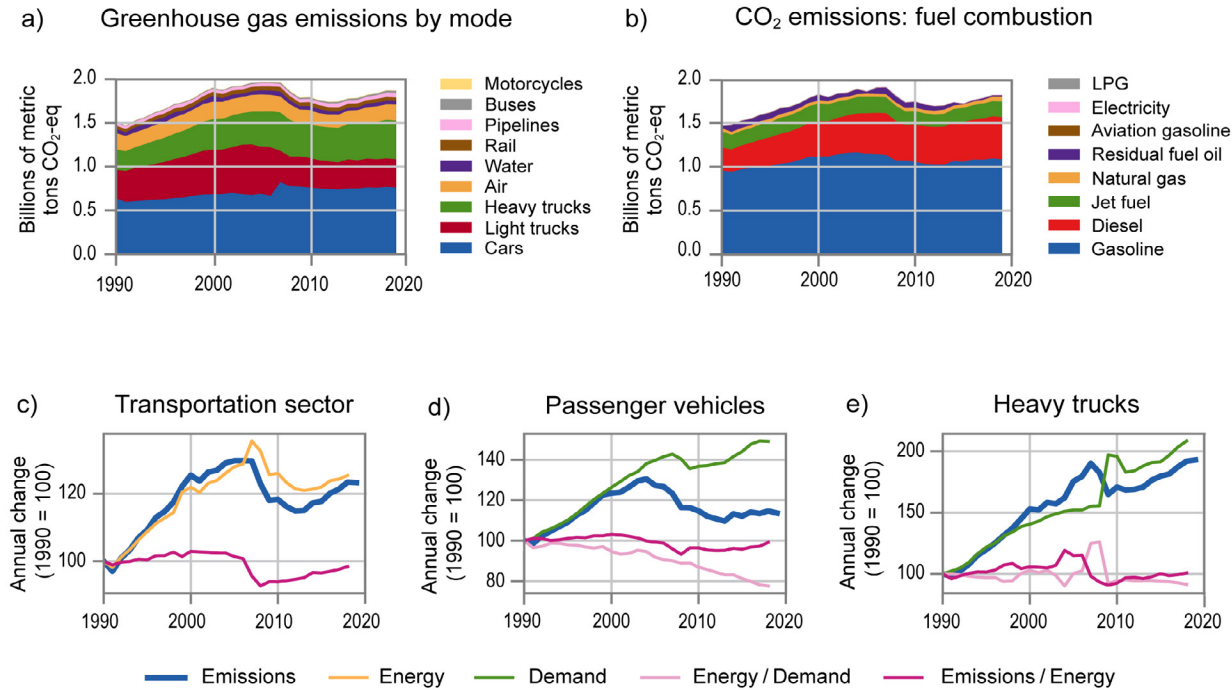
Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) procedentes de la generación de electricidad disminuyeron casi el 40 % entre 2005 y 2020.

**Figura 32.3.** La disminución de las emisiones relacionadas con la electricidad entre 2000 y 2020 (a) puede explicarse por el descenso de la generación de carbón con altas emisiones y el aumento de la generación a partir de fuentes bajas en emisiones (gas natural) y sin emisiones (eólicas y solares) (b). CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Adaptado de Scott Institute for Energy Innovation 2017<sup>17</sup> [CC BY-SA 4.0].

### Emisiones del sector del transporte

Las emisiones de GHG del sector del transporte en 2019 fueron de 1,874 Mt de CO<sub>2</sub>-eq<sup>7</sup>. La mayor parte de las emisiones del transporte son de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión de gasolina (59.6 %, sobre todo en camiones ligeros y vehículos), diésel (26.4 %, sobre todo en camiones pesados, autobuses y trenes) y combustible para aviones (9.8 %; Figura 32.4). A diferencia de las emisiones del sector eléctrico, las del transporte aumentaron el 23 % entre 1990 y 2018, en gran parte como reflejo del crecimiento del 49 % de la demanda de transporte en vehículos de pasajeros durante el período (medido en pasajeros-kilómetro, o la distancia recorrida en kilómetros multiplicada por el número de pasajeros), que se vio parcialmente compensado por un descenso del 22 % de la energía requerida por pasajero-kilómetro. Durante el mismo período 1990-2018, la demanda de camiones pesados (medida en vehículos-kilómetro, o la distancia total recorrida por la flota de camiones) aumentó más del doble, y las mejoras en energía por vehículo-kilómetro fueron más moderadas (una disminución del 8.6 % en la energía requerida por vehículo-kilómetro).

## Tendencias de las emisiones del transporte e impulsores subyacentes



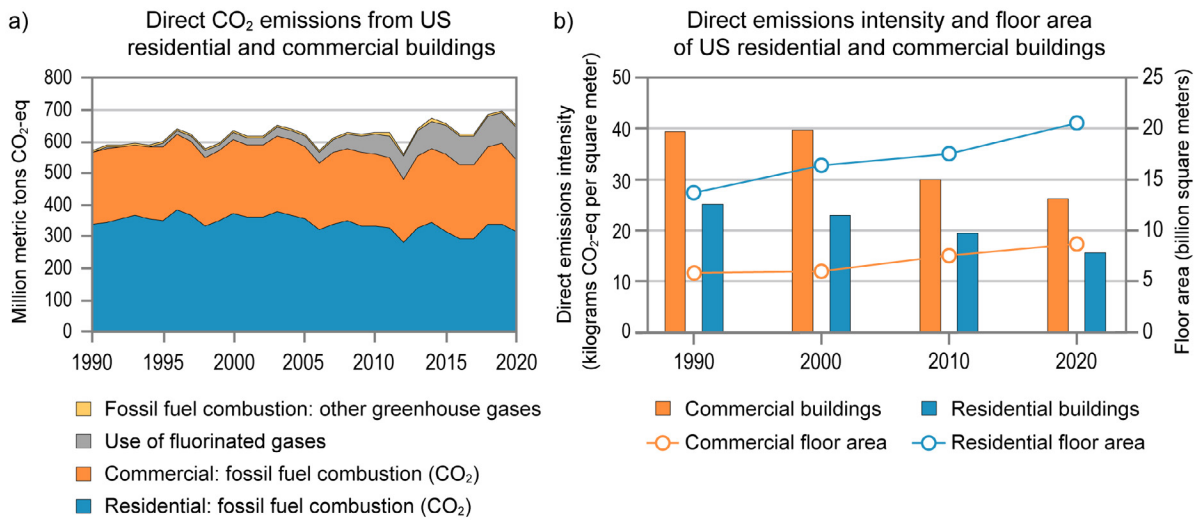
**Las emisiones del transporte disminuyeron entre 2007 y 2012, pero han aumentado desde entonces.**

**Figura 32.4.** La figura muestra las emisiones de gases de efecto invernadero de los EE. UU. por modo de transporte. Las emisiones del transporte disminuyeron a partir de 2007 (a), lo que refleja la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) procedentes de la quema de combustibles (b), pero ambas han vuelto a aumentar desde 2012. La tendencia fue constante en los distintos tipos de vehículos, impulsada por una caída de la demanda durante un período de recesión y altos precios del combustible (c, d, e). Los vehículos de pasajeros incluyen autos, camiones ligeros y autobuses. LPG significa gas licuado de petróleo o propano; CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Créditos de la figura: Stanford University.

## Emisiones de edificios residenciales y comerciales

Las emisiones directas de GHG de los edificios residenciales y comerciales fueron de 699 Mt de CO<sub>2</sub>-eq en 2019. Desde 1990, las emisiones directas de los edificios residenciales y comerciales en los EE. UU. (es decir, excluida la electricidad) han aumentado aproximadamente un 14 % (Figura 32.5a). El aumento está relacionado principalmente con el crecimiento constante de las emisiones fugitivas de gases fluorados procedentes de los sistemas de enfriamiento de los edificios<sup>8</sup>. Durante el mismo período, las mejoras de la eficiencia energética y la creciente electrificación han mantenido estables las emisiones directas de CO<sub>2</sub> procedentes de la quema de combustibles en el sitio a pesar del aumento del 50 % de la superficie de los edificios residenciales y comerciales (Figura 32.5b)<sup>18,19</sup>.

## Tendencias de las emisiones e intensidades de los edificios residenciales y comerciales



**Las emisiones globales de gases de efecto invernadero de los edificios han aumentado a pesar de los pequeños descensos de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la quema de combustibles fósiles.**

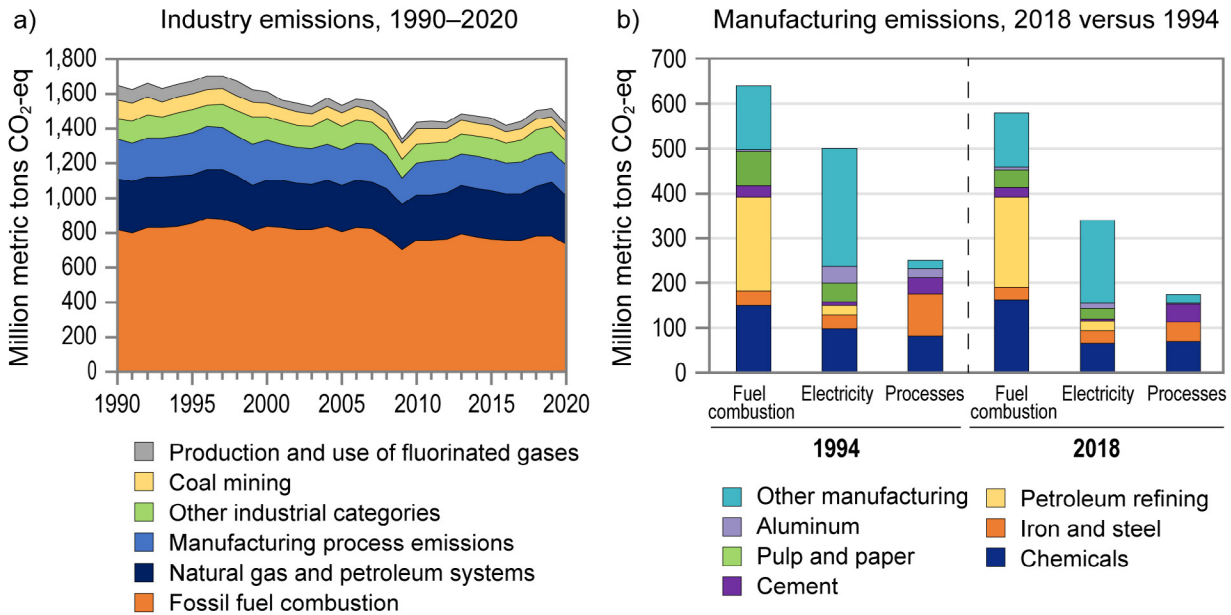
**Figura 32.5.** Las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) procedentes de la quema de combustibles en el sitio en los edificios en los EE. UU. han disminuido moderadamente desde 2005 (a), debido a la disminución de las emisiones relacionadas con el combustible por superficie construida (b), pero las emisiones totales de gases de efecto invernadero de los edificios han aumentado durante el mismo período debido tanto al crecimiento de la superficie construida (líneas del panel b) como al aumento de los niveles de gases fluorados que escapan de los sistemas de enfriamiento de los edificios (zona gris del panel a). CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Créditos de la figura: University of California, Santa Barbara.

### Emisiones del sector industrial

Las emisiones de GHG del sector industrial fueron de 1,568 Mt de CO<sub>2</sub>-eq en 2019<sup>8</sup>. Las emisiones directas del sector industrial, incluida la quema de combustibles en el sitio, así como todas las emisiones de GHG fugitivas y de proceso (p. ej., las emisiones procedentes de la calcinación de piedra caliza en la producción de cemento y las fugas de metano de la infraestructura de petróleo y gas), disminuyeron el 14 % entre 1990 y 2020, debido principalmente a la disminución de la quema total de combustibles fósiles, la producción y el uso de gases fluorados y las emisiones de proceso relacionadas con los metales (Figura 32.6). El sector manufacturero (es decir, la producción de bienes y materiales) es la mayor fuente de emisiones directas dentro del conjunto del sector industrial y es responsable de importantes emisiones del sector eléctrico relativas a la compra de electricidad y calor (Figura 32.6b). Seis subsectores manufactureros clave (refinación de petróleo, productos químicos, cemento, hierro y acero, aluminio y productos forestales) representan alrededor del 70 % de todas las emisiones atribuibles al sector manufacturero (Figura 32.6b).

Entre 1994 y 2018, las emisiones relacionadas con la electricidad procedentes de la industria manufacturera en los EE. UU. han disminuido en torno a un 32 % debido a la mejora de la eficiencia de los procesos, el despliegue de sistemas combinados de calor y electricidad y la descarbonización de la electricidad adquirida. Sin embargo, las emisiones directas procedentes de la quema de combustibles fósiles en el sitio han disminuido solo un 10 % durante el mismo período y ahora representan aproximadamente las tres cuartas partes de las emisiones directas de la fabricación (Figura 32.6b).

### Tendencias de las emisiones industriales



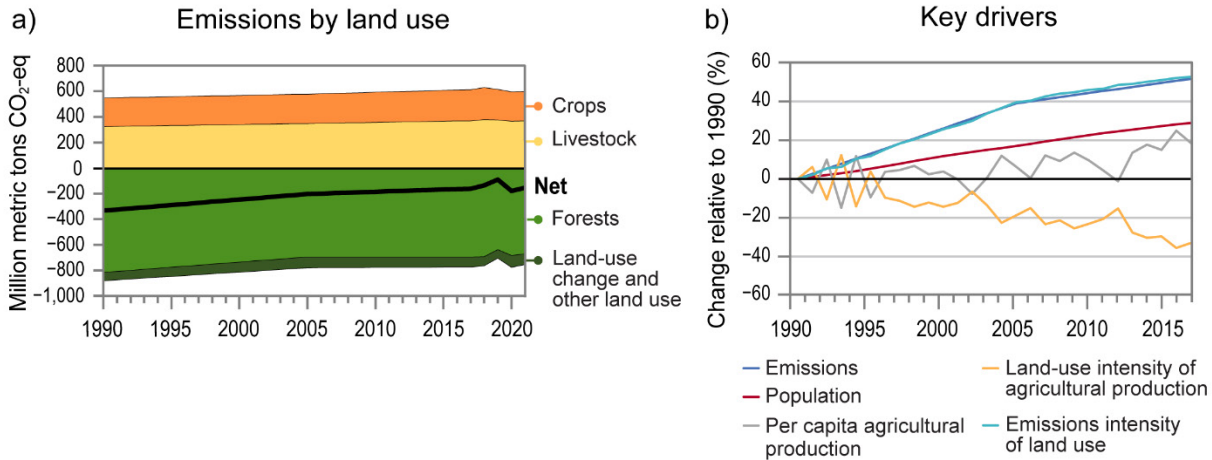
**Las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria en EE. UU., incluida la manufacturera, han disminuido en décadas recientes.**

**Figura 32.6.** Las emisiones de gases de efecto invernadero de la industria en los EE. UU. han disminuido moderadamente desde 2005 en todas las fuentes (a). El panel b muestra el desglose de las emisiones de la industria en 1994 y 2018 por subsectores manufactureros clave, como productos químicos, hierro y acero, pasta y papel y aluminio. No se dispone de datos sobre la intensidad de las emisiones de la industria a lo largo del tiempo. CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Créditos de la figura: University of California, Santa Barbara.

### Emisiones relacionadas con la tierra

Las emisiones anuales de GHG de los EE. UU. relacionadas con el uso de la tierra en 2019 pueden dividirse en emisiones de 615 Mt de CO<sub>2</sub>-eq procedentes de la agricultura y una absorción de 704 Mt de CO<sub>2</sub>-eq por otros usos de la tierra y cambios en el uso de la tierra (incluidos los bosques; Figura 32.7). Así, en 2019, se produjo una absorción neta relacionada con la tierra (es decir, emisiones negativas) de 90 Mt de CO<sub>2</sub>-eq. Los bosques absorben carbono, pero la cantidad de carbono retenido por las tierras forestales en los EE. UU. ha disminuido de 816 Mt CO<sub>2</sub> en 1990 a 638 Mt CO<sub>2</sub> en 2019<sup>8</sup> debido a una combinación de sequías, incendios forestales y perturbaciones causadas por insectos y enfermedades (Recuadro 7.2; KM 6.1)<sup>20,21,22</sup>. Las emisiones agrícolas (excluida la quema de combustibles) aumentaron ligeramente de 548 Mt CO<sub>2</sub>-eq en 1990 a 615 Mt CO<sub>2</sub>-eq en 2019. La absorción neta de 90 Mt de CO<sub>2</sub>-eq procedentes de tierras en los EE. UU. en 2019 representa un descenso del 73 % con respecto a la absorción de 333 Mt CO<sub>2</sub>-eq en 1990<sup>8</sup>.

## Tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de la tierra y factores subyacentes



**Los bosques en los EE. UU. retienen más carbono del que emite la agricultura, pero el sumidero forestal se ha debilitado en décadas recientes.**

**Figura 32.7.** Las emisiones netas de gases de efecto invernadero procedentes del uso de la tierra en los EE. UU. son negativas, lo que significa que el carbono absorbido por los bosques es mayor que las emisiones agrícolas (a). Sin embargo, este sumidero neto se ha debilitado desde 2005, impulsado por el aumento de la intensidad de las emisiones del uso de la tierra (curva azul claro en el panel b) y a pesar de la disminución de la intensidad de uso de la tierra en la producción agrícola (curva amarilla en el panel b). CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Créditos de la figura: University of California, Irvine.

### Mensaje clave 32.2

#### Sabemos cómo reducir drásticamente las emisiones

Un sistema energético de los EE. UU. con emisiones netas cero se basaría en mejoras generalizadas de la eficiencia energética, una generación sustancial de electricidad a partir de energía solar y eólica y una electrificación generalizada del transporte y la calefacción (*confianza alta*). Los combustibles bajos en carbono seguirían siendo necesarios para algunas aplicaciones del transporte y de la industria difíciles de electrificar (*confianza alta*). Las emisiones relacionadas con la tierra en los EE. UU. podrían reducirse al aumentar la eficiencia de los sistemas alimentarios y mejorar las prácticas agrícolas, así como al proteger y restaurar tierras naturales (*confianza alta*). En todos los sectores, muchas de estas opciones son económicamente viables en la actualidad (*confianza alta*).

#### Oportunidades establecidas para reducir las emisiones relacionadas con la energía

En los estudios de modelación, los sistemas energéticos profundamente descarbonizados y con cero emisiones netas comparten varias características comunes, pero los enfoques regionales pueden depender de las diferencias en recursos<sup>23,24</sup>, bases industriales<sup>25</sup>, infraestructuras existentes<sup>26,27</sup>, geografía<sup>28</sup>, gobierno y política<sup>29</sup>, aceptación pública<sup>30</sup> y prioridades políticas más amplias<sup>31</sup>.

## Mejorar la eficiencia energética

Mejorar la eficiencia energética significa suministrar el mismo nivel de servicios de uso final o de producción utilizando menos energía. La eficiencia de edificios y electrodomésticos puede mejorarse mediante el diseño o la readaptación (p. ej., al mejorar el aislamiento)<sup>32</sup>, así como al optimizar el control y la gestión de los dispositivos (p. ej., climatización e iluminación; KM 12.3; Figura 5.5)<sup>33</sup>. El sector del transporte también puede mejorar su eficiencia: el diseño urbano puede reducir la demanda de desplazamientos<sup>34,35</sup>; los modos de transporte público y activo pueden reducir en gran medida el consumo de energía por pasajero-milla<sup>36,37</sup>; y los motores avanzados, la electrificación, la reducción del peso de los vehículos y las mejoras aerodinámicas pueden reducir el uso de energía por pasajero-milla (KM 13.3)<sup>38,39,40</sup>. En escenarios modelo de sistemas energéticos que alcanzan con éxito el objetivo de cero emisiones netas de CO<sub>2</sub> el consumo total de energía en los EE. UU. suele disminuir con respecto a los niveles actuales, a pesar del crecimiento económico y demográfico<sup>41,42</sup>.

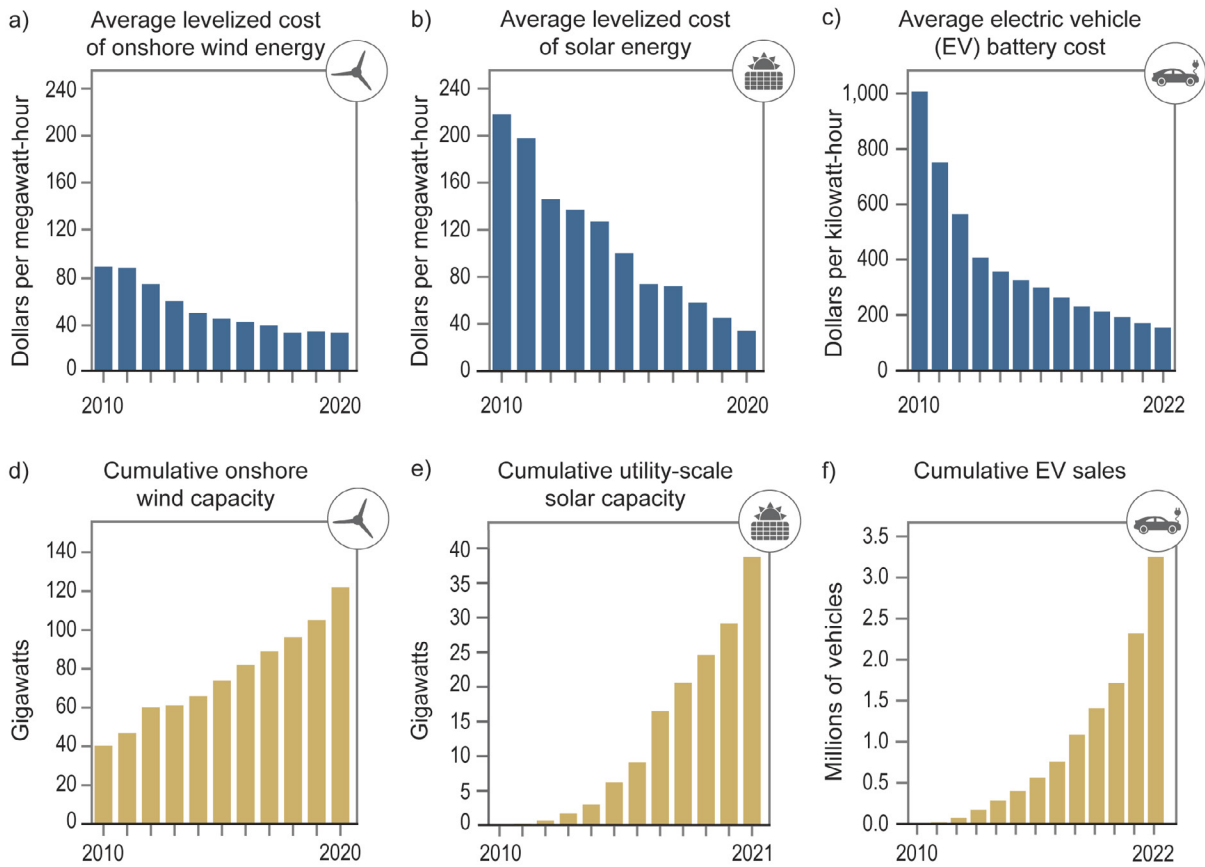
Una de las preocupaciones que suscita la eficiencia energética es si puede inducir efectos rebote de distintos tipos. Los estudios han demostrado que el efecto rebote directo (es decir, el uso de más cantidad de un bien o servicio a medida que se hace más asequible) es bajo en el contexto de los bienes y servicios energéticos, pero hay más incertidumbre en cuanto a los efectos rebote indirectos (es decir, cómo un aumento de la eficiencia energética de un bien o servicio puede provocar un cambio en el uso de otros bienes y servicios o cambios en la economía en general)<sup>43,44</sup>.

## Descarbonizar el sector eléctrico

Las opciones para reducir las emisiones del sistema eléctrico incluyen energías renovables variables (p. ej., los recursos solares y eólicos, que no están disponibles bajo demanda; KM 5.3), energías renovables despachables o “firmes” (p. ej., biomasa, energía hidroeléctrica y geotérmica, que pueden estar disponibles bajo demanda) y otros recursos despachables de bajas emisiones (p. ej., nuclear y generadores fósiles equipados con captura y almacenamiento de carbono [carbon capture and storage, CCS]); tecnologías de almacenamiento de energía; mejora de la transmisión (tanto actualización de conductores como nuevos derechos de paso); y gestión de la demanda. El ritmo y la escala del despliegue de estas tecnologías en el futuro dependen de la trayectoria incierta de sus costos y de los mercados energéticos, así como de una serie de factores no económicos (KM 32.4)<sup>45,46,47,48,49,50,51,52,53</sup>.

Sin embargo, dado el desplome de sus costos (Figura 32.8a, b) y el creciente apoyo político (p. ej., la Ley de Reducción de la Inflación de 2022<sup>54</sup>), se espera que los recursos energéticos renovables variables —especialmente la generación eólica y solar fotovoltaica— desempeñen un papel fundamental en la descarbonización de los sistemas eléctricos en Estados Unidos. Los modelos de sistemas energéticos proyectan que la capacidad de la energía eólica y solar tendría que aumentar de 2 a 10 veces más rápido cada año que las tasas históricas máximas (Figura 32.9b) para alcanzar el objetivo de 2030 de reducir a la mitad las emisiones de GHG en toda la economía y los objetivos de cero emisiones netas a mediados de siglo (Figura 32.1)<sup>41,42</sup>. En tales escenarios, la expansión del almacenamiento de energía suele apoyar una mayor dependencia de la energía eólica y solar (Figura 32.1)<sup>41,42</sup>.

### Tendencias históricas de los costos y la capacidad de las tecnologías energéticas con baja emisión de carbono en Estados Unidos

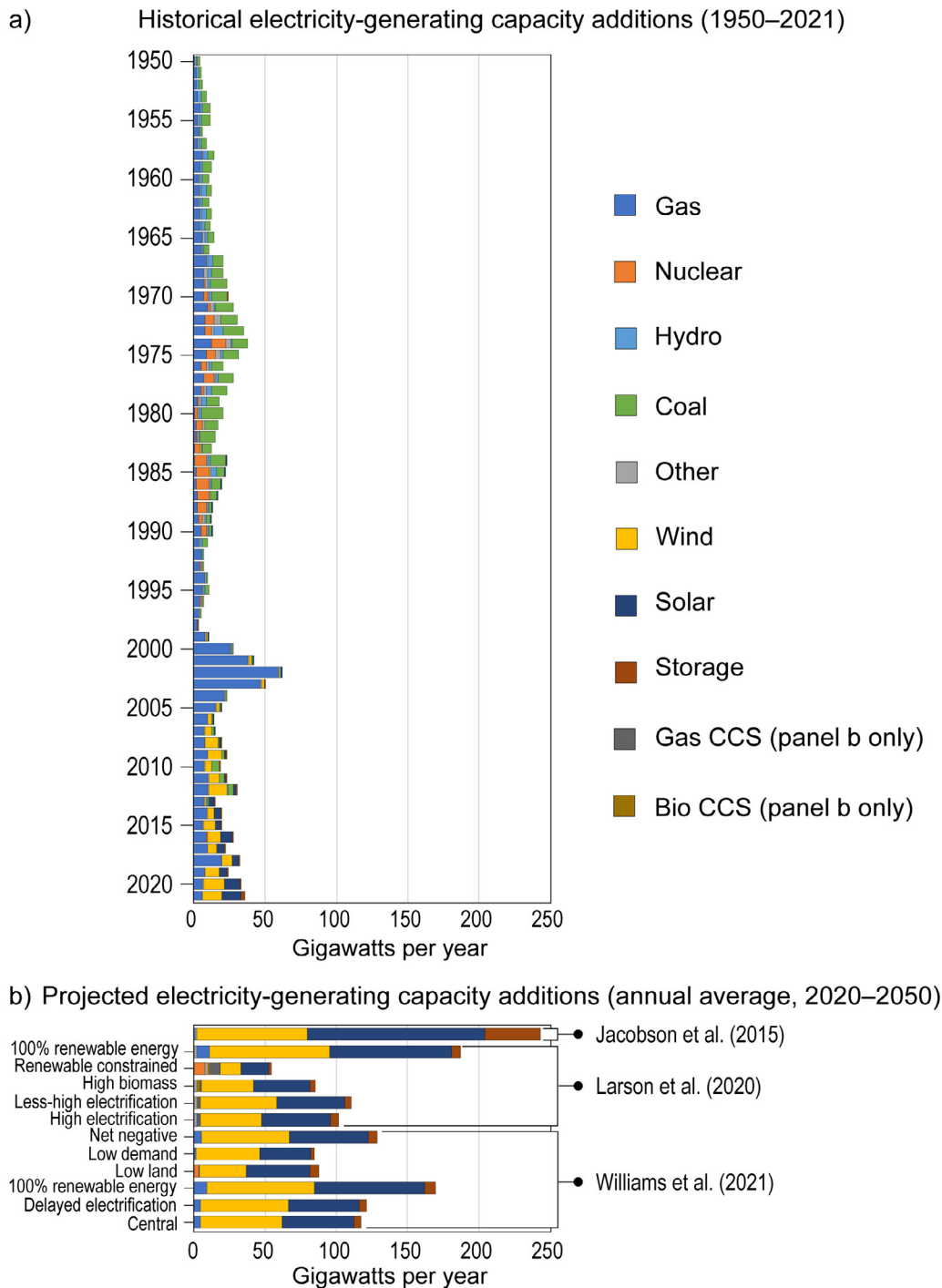


**Los costos de las fuentes de energía renovable y de las baterías de los vehículos eléctricos han disminuido a medida que aumentaba su despliegue acumulado.**

**Figura 32.8.** Costos de la energía eólica terrestre (a), la energía solar fotovoltaica (b) y baterías de vehículos eléctricos (c) han disminuido drásticamente desde el año 2000 (los datos mostrados aquí comienzan en 2010), ya que las capacidades acumuladas de generación eólica y solar (d, e) y el número acumulado de vehículos eléctricos vendidos (f) han aumentado. Créditos de la figura: National Renewable Energy Laboratory, NOAA NCEI y CISS NC.



### Incremento anual histórico y proyectado de la capacidad neta cero por tecnología en los EE. UU. en escenarios netos cero



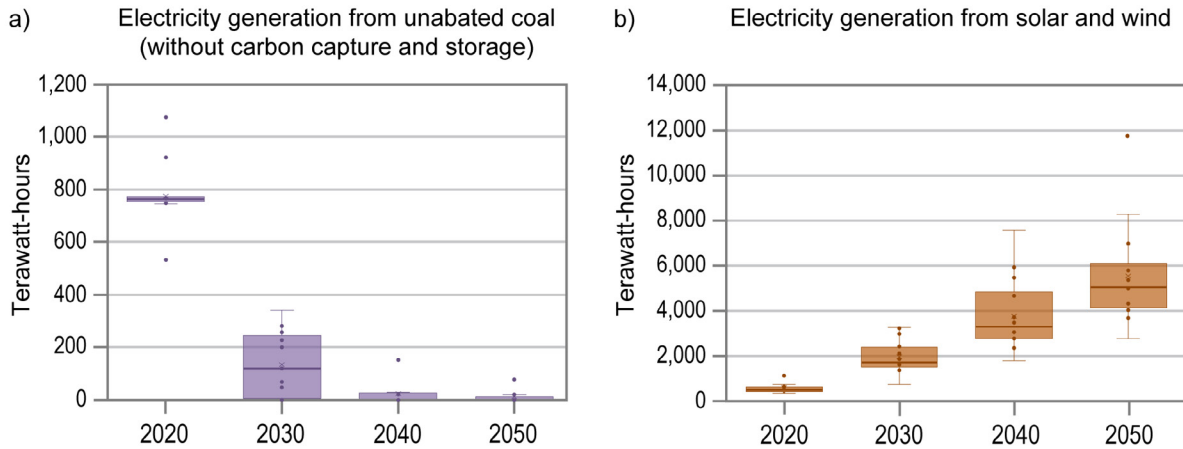
Adapted with permission from Elsevier ©2021.

**Para alcanzar el cero neto, Estados Unidos tendrá que añadir más capacidad de generación eléctrica en cada uno de los próximos 30 años de la que ha añadido históricamente.**

**Figura 32.9.** Desde 1950, el aumento de la capacidad de generación eléctrica de los EE. UU. ha superado los 50 gigavatios (gigawatts, GW) solo en un año, 2002 (a). En comparación, los escenarios de sistemas energéticos con cero emisiones netas elaborados por modelos proyectan aumentos medios de la capacidad de generación de electricidad de más de 50 GW anuales cada año entre 2020 y 2050 (b). CCS se refiere a la captura y almacenamiento de carbono. Consulte Jacobson *et al.* 2015; Larson *et al.* 2020; y Williams *et al.* 2021<sup>49,52,59</sup>. Adaptado de Bistline 2021<sup>60</sup> con permiso de Elsevier (<https://www.sciencedirect.com/journal/joule>).

Los mismos escenarios de modelos proyectan sistemáticamente el rápido declive de la generación de electricidad a partir del carbón en sistemas descarbonizados hasta casi cero en 2030 (Figura 32.10)<sup>41,42</sup>. En contraste, la generación de electricidad a partir de gas natural disminuye más lentamente en la mayoría de estos escenarios de emisiones netas cero, lo que facilita la penetración de energías renovables variables pero funciona con menos frecuencia a lo largo del tiempo, a menos que esté equipada con CCS<sup>52,55,56</sup>.

### Proyección de generación de electricidad a partir de carbón y energía solar/eólica



**Los modelos proyectan un fuerte descenso de la electricidad generada con carbón y un aumento de las energías renovables.**

**Figura 32.10.** En todos los escenarios netos cero elaborados por los modelos se prevé que la mediana de la generación de electricidad de carbón en los EE. UU. (líneas horizontales gruesas) disminuya drásticamente entre 2020 y 2030 (a). Mientras tanto, en los mismos escenarios, la mediana de la generación solar y eólica aumentaría de forma constante entre 2020 y 2050 (b). Los gráficos muestran los escenarios individuales como puntos, los rangos de los percentiles 25-75 como rectángulos y los rangos de los percentiles 10-90 como finas líneas verticales. La media de cada conjunto de escenarios se representa con una X. Créditos de la figura: University of California, Irvine y Electric Power Research Institute.

Por último, las emisiones netas de CO<sub>2</sub> a menudo mantienen —pero no amplían en gran medida— la capacidad nuclear e hidroeléctrica existente en ausencia de descensos significativos de los costos (como mejora económica de pequeños diseños modulares; KM 5.3) o limitaciones en el despliegue de otras tecnologías<sup>41,42,57</sup>. En contraste, tanto la infraestructura de transmisión (es decir, líneas eléctricas) como las transferencias internacionales e interregionales de electricidad suelen aumentar en los escenarios de descarbonización, aunque la escala de dichos aumentos varía<sup>41,42,58</sup>.

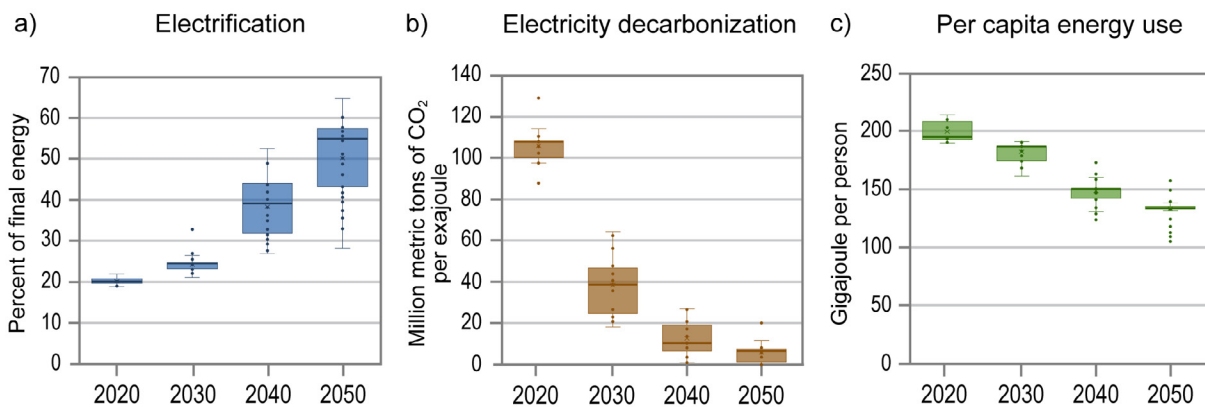
### Electrificar los usos finales de la energía

A medida que se descarbonizan los sistemas eléctricos, los escenarios de los modelos energéticos proyectan sistemáticamente una electrificación generalizada de los usos finales de la energía, como el transporte por carretera y el calor para los edificios y la industria (KM 5.1)<sup>41,42,49,51,52,53,61</sup>. La electricidad también puede utilizarse para producir combustibles bajos en carbono, como el hidrógeno y los e-combustibles (combustibles líquidos producidos al combinar carbono capturado de la atmósfera con hidrógeno producido por electrólisis), para aplicaciones difíciles de electrificar (Recuadro 32.1)<sup>62</sup>. La proporción de la demanda final de energía en los EE. UU. (es decir, la energía utilizada) cubierta por la electricidad en los sistemas energéticos con cero emisiones netas dependerá de los costos de las alternativas con bajas emisiones de carbono, como los biocombustibles y el hidrógeno, pero las estimaciones oscilan entre el 30 % y el 60 % en 2050, frente al 20 % actual (Figura 32.11)<sup>41,42</sup>.

En el sector del transporte, los vehículos eléctricos (electric vehicles, EV) ligeros han recibido apoyo político (p. ej., devoluciones de impuestos) tanto a nivel estatal como federal durante mucho tiempo, y las ventas de nuevos EV han aumentado en los años recientes (Figura 32.8)<sup>63,64,65,66</sup>. Se espera que la cuota de vehículos eléctricos en las ventas de vehículos ligeros nuevos en los EE. UU. aumente rápidamente<sup>66,67</sup>, como ocurre en los escenarios de modelos que alcanzan las emisiones netas cero a mediados de siglo<sup>41,42</sup>. Muchos vehículos medianos y pesados también pueden electrificarse<sup>68</sup>, aunque algunas aplicaciones (p. ej., los viajes de larga distancia) pueden presentar retos especiales<sup>69,70,71,72,73</sup>. La descarbonización de los sectores del transporte más difíciles de electrificar (p. ej., la aviación y el transporte marítimo internacional) puede requerir biocombustibles líquidos o combustibles sintetizados utilizando hidrógeno electrolítico y carbono capturado de la atmósfera<sup>74,75</sup>.

En la medida en que la electricidad se genere a partir de fuentes no emisoras, la electrificación del calentamiento de espacios y del agua reduciría drásticamente las emisiones directas de los edificios residenciales y comerciales en Estados Unidos (donde estos usos finales representan la mayor parte del consumo de gas natural y petróleo)<sup>76,77,78</sup>. Del mismo modo, la mayor parte de la demanda energética industrial podría electrificarse utilizando las tecnologías existentes<sup>79</sup>, aunque conseguir emisiones netas cero en algunas industrias puede plantear retos especiales<sup>80,81,82,83</sup>; sobre todo en relación con los costos de suministrar calor a alta temperatura con electricidad<sup>84</sup> o cambios fundamentales en los procesos, como el cambio a la reducción directa del mineral de hierro con hidrógeno electrolítico o la instalación de captura y almacenamiento de carbono en miles de hornos de cemento de todo el mundo<sup>85</sup>.

### Características de los sistemas energéticos en los EE. UU. en escenarios de mitigación climática



**Los escenarios del modelo neto-cero muestran grandes aumentos de la energía eléctrica, acompañados de la descarbonización de las fuentes de electricidad y de modestos descensos en el uso total de energía por persona.**

**Figura 32.11.** En todos los escenarios del modelo cero neto, entre 2020 y 2050 la mediana de la proporción de toda la energía utilizada (líneas horizontales gruesas) por los consumidores finales que es electricidad aumenta (a), la mediana de la intensidad de carbono de la electricidad disminuye (b) y la mediana de energía per cápita disminuye ligeramente (c). Los gráficos muestran los escenarios individuales como puntos, los rangos de los percentiles 25-75 como rectángulos y los rangos de los percentiles 10-90 como finas líneas verticales. La media de cada conjunto de escenarios se representa con una X. CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono. Créditos de la figura: University of California, Irvine; Electric Power Research Institute; y Evolved Energy Research.

## Oportunidades establecidas para reducir las emisiones relacionadas con la tierra

A pesar de la creciente demanda de alimentos y de los impactos del cambio climático en la agricultura, existen múltiples opciones para reducir las emisiones derivadas del uso de la tierra y proteger y mejorar los sumideros terrestres de carbono (Capítulo 11).

### Utilizar la tierra más productiva para la agricultura

La agricultura requiere más tierra, por mucho, que cualquier otra actividad humana<sup>86</sup>. Una forma de reducir la tierra necesaria para producir alimentos es seguir cultivando las tierras más productivas (las que producen más cosechas por superficie). Retirar del cultivo las zonas más productivas conllevaría a un aumento de la superficie total necesaria para la agricultura<sup>87</sup>. Por tanto, la pérdida de tierras agrícolas productivas en los EE. UU. a favor de la expansión o incluso de la restauración podría provocar un cambio sustancial en el uso de la tierra y las emisiones de GHG relacionadas en otros lugares (p. ej., si los productos agrícolas demandados se importan de otras regiones)<sup>88,89</sup>. Por estas razones, los estudios han sugerido que los esfuerzos de mitigación deberían dar prioridad a la restauración de tierras marginales (es decir, no las más productivas)<sup>90</sup>.

### Reducir el desperdicio de alimentos

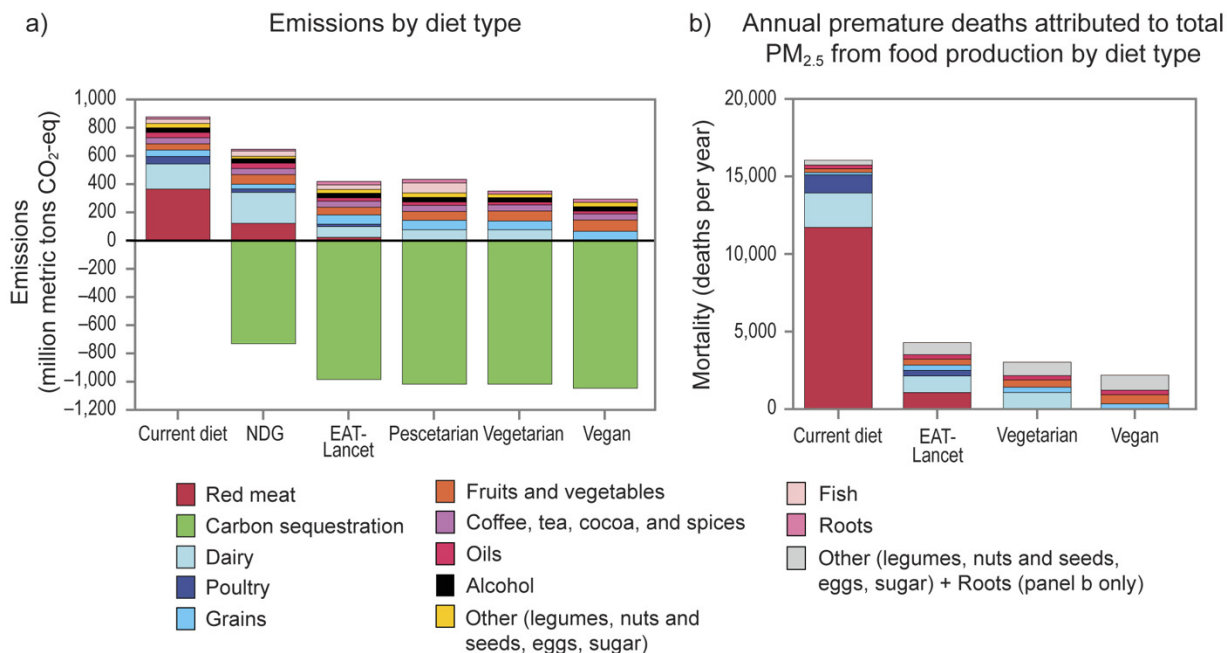
Actualmente se desperdicia más de un tercio de todos los alimentos en los EE. UU., de los cuales más del 40 % son alimentos desechados por minoristas y consumidores (Recuadro 11.2; Figura 11.12)<sup>91,92</sup>. Las campañas plurianuales (de 4 a 11 años de duración) llevadas a cabo en otros cinco países desarrollados consiguieron reducir el desperdicio de alimentos por persona entre un 8 % y un 29 % gracias a la educación pública y a iniciativas públicas y privadas<sup>91</sup>. Suponiendo que pudieran conseguirse reducciones similares, las tierras agrícolas en los EE. UU. y las emisiones de GHG relacionadas con la tierra podrían reducirse entre un 4 % y un 13 %.

### Cambio de dietas

Las emisiones de GHG producidas durante la producción, la distribución, el transporte y la venta al por menor o en restaurantes de alimentos varían según los distintos alimentos, por lo que dietas diferentes conllevarán a distintos niveles de emisiones de GHG durante el ciclo de vida<sup>93,94,95,96</sup>. En particular, aunque la carne es una buena fuente de proteínas y micronutrientes, suele producir más emisiones por caloría que los alimentos de origen vegetal porque la energía se pierde en cada nivel trófico<sup>93</sup>. Las emisiones relacionadas con la producción de carne también varían: por ejemplo, los rumiantes suelen producir muchas más emisiones de GHG por caloría de carne y por gramo de proteína que las aves de corral (Figura 11.8)<sup>97</sup>. Al reducir la demanda de alimentos intensivos en emisiones, el cambio a dietas de pescados, vegetarianas, veganas, mediterráneas o “flexitarianas” (menos consumo de carne pero no estrictamente vegetarianas) puede reducir las emisiones de GHG relacionadas con la tierra, al tiempo que proporciona beneficios directos para la salud (Figura 32.12)<sup>94,98,99,100</sup>, aunque los análisis y modelos difieren en cuanto al nivel de la futura demanda de alimentos relacionada con dichas dietas y otros cambios socioeconómicos<sup>101</sup>. Las dietas cambiantes y los cambios asociados en las prácticas agrícolas tienen implicaciones para el cambio en el uso de la tierra, así como para las cadenas de suministro, la contaminación del aire y la salud humana<sup>102</sup>. La consideración de la energía y otros insumos por unidad de producción y los impactos resultantes sobre las emisiones netas de GHG es importante para comparar las diferentes opciones dietéticas.

Sin embargo, el 10.4 % de los hogares en los EE. UU. padece inseguridad alimentaria (Recuadro 11.1)<sup>103</sup>, por lo que cualquier enfoque para reducir el consumo de alimentos con mayores emisiones que se traduzca en un aumento de los precios de los alimentos podría perjudicar de forma desproporcionada estos hogares. Por el contrario, las políticas podrían fomentar dietas menos intensivas en emisiones y, al mismo tiempo, reducir los costos de los alimentos y aumentar las posibilidades de elección de los consumidores, al hacer más accesibles diversas opciones basadas en plantas y otras opciones bajas en emisiones, nutritivas y asequibles.

## Reducción de emisiones y beneficios para la salud derivados del cambio de dieta



**Los cambios en la dieta de los estadounidenses podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de la tierra, aumentar la retención de carbono y reducir la contaminación del aire.**

**Figura 32.12.** Los estudios han estimado las reducciones potenciales de las emisiones de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) (a) y las muertes relacionadas con la contaminación del aire (b) si cambiara la proporción de alimentos en la dieta (promedio) actual de los estadounidenses. Aunque los cambios específicos en la dieta varían según los estudios, todos reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminación, así como aumentarían la retención de carbono en relación con la dieta actual. EAT-Lancet se refiere a una dieta “flexitariana” basada principalmente en plantas, pero que incluye pequeñas cantidades de pescado, carne y productos lácteos. NDG se refiere a las directrices dietéticas nacionales (national dietary guidelines, NDG) aprobadas por el gobierno. PM<sub>2.5</sub> se refiere a partículas finas de 2.5 micrómetros o menos de diámetro. CO<sub>2</sub>-eq = dióxido de carbono equivalente. Créditos de las figuras: (a) University of Minnesota, NOAA NCEI y CISESS NC; (b) adaptado de Domingo *et al.* 2021<sup>102</sup> [CC BY-NC-ND 4.0].

### Mejorar la gestión de las tierras de cultivo y los pastos

Existen numerosas oportunidades para disminuir la intensidad de las emisiones (o aumentar la retención; consulte el Recuadro 32.2) de las tierras de cultivo y los pastos, entre las que se incluyen 1) mejorar la salud del suelo; 2) mejorar la gestión de los fertilizantes nitrogenados; 3) aumentar el número de árboles y otras plantas perennes en el paisaje (p. ej., mediante la agrosilvicultura; consulte el Capítulo 11),<sup>104,105,106;</sup> y 4) evitar las emisiones de metano. La salud del suelo y la retención de carbono también pueden mejorarse mediante enmiendas (incluido el biocarbón; Figura 11.5), cultivos de cobertura, reducción del laboreo<sup>107</sup> y la diversificación de las rotaciones de cultivos<sup>108</sup>. La implementación cuidadosa y sostenida de estas prácticas puede aumentar no solo el carbono del suelo, sino también el rendimiento, la resiliencia y la rentabilidad.

Alinear mejor el momento y la cantidad de fertilización con las necesidades de las plantas puede reducir el uso de fertilizantes<sup>109,110</sup> y, por tanto, reducir las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) del suelo y las de combustibles fósiles procedentes de la producción de fertilizantes. Los fertilizantes con inhibidores sintéticos de la nitrificación pueden reducir aún más las emisiones de N<sub>2</sub>O<sup>111</sup>. El aumento de la eficiencia de los fertilizantes y la inhibición de los procesos de nitrificación en el suelo pueden reducir conjuntamente las emisiones de N<sub>2</sub>O en aproximadamente un 50 %<sup>112,113</sup>.

También existen opciones viables para reducir las fuentes de emisiones de metano agrícolas (ganado y arroz) y de residuos (vertederos y aguas residuales)<sup>114</sup>. El metano es un GHG de vida relativamente corta que ha contribuido al menos en un 25 % al calentamiento del clima hasta la fecha<sup>115,116</sup>. Por consiguiente, una reducción técnicamente viable de las emisiones de metano a corto plazo podría retrasar el calentamiento global por décadas en un 30 %, lo que evita un cuarto de grado Celsius de calentamiento para mediados de siglo<sup>114</sup>. Además de las fuentes de metano relacionadas con la tierra, es posible lograr grandes reducciones en el sector de petróleo y gas<sup>117</sup>, principalmente reparando las fugas con un costo neto nulo o muy bajo<sup>114</sup> e idealmente dando prioridad a las fuentes desproporcionadamente grandes (es decir, los superemisores)<sup>118,119,120</sup>.

### Evitar la conversión y monitorear los flujos de carbono en tierras no gestionadas

Entre 50 y 150 Mt de emisiones de CO<sub>2</sub> anuales podrían evitarse deteniendo las conversiones de tierras no gestionadas en Estados Unidos (es decir, bosques naturales, praderas, humedales u otros ecosistemas en los que no ha habido una influencia o intervención humana sustancial)<sup>121</sup>. Las estrategias para frenar estas conversiones incluyen la densificación de las zonas ya urbanizadas, la zonificación y los incentivos fiscales a la propiedad, así como la protección de la tierra mediante servidumbres de conservación y parques públicos<sup>122,123,124,125</sup>. En relación con esta oportunidad, resulta preocupante la reciente disminución de la retención de carbono por parte de los bosques en los EE. UU. (KM 32.1). Un mayor debilitamiento de este sumidero de carbono haría que alcanzar el cero neto fuera proporcionalmente mucho más difícil. Por lo tanto, es importante mejorar el monitoreo de los flujos de carbono forestal y de sus impulsores, incluidos los de las tierras no gestionadas y los de la Alaska Boreal (KM 7.2)<sup>126,127,128</sup>.

### Mensaje clave 32.3

**Para alcanzar las emisiones netas cero hay que explorar otras opciones de mitigación**

Aunque actualmente hay muchas opciones de mitigación disponibles y costo-efectivas, el nivel y los tipos de tecnologías energéticas y de gestión del carbono en los sistemas energéticos con cero emisiones netas dependen de avances tecnológicos aún inciertos, de la aceptación pública, de la elección de los consumidores y de la evolución futura de instituciones, mercados y políticas (*confianza alta*). Entre los objetivos más atractivos para la investigación, el desarrollo y la demostración se encuentran captura, utilización y almacenamiento de carbono; almacenamiento de energía de larga duración; combustibles y materias primas bajos en carbono; gestión de la demanda; transmisión de electricidad de nueva generación; eliminación de dióxido de carbono; alimentos modernos; e intervenciones para reducir las emisiones de la industria y la agricultura (*confianza media*).

### Posibles oportunidades para reducir las emisiones relacionadas con la energía

Hay muchas incertidumbres y preguntas pendientes relacionadas con la mitigación de las emisiones relacionadas con la energía. Estas incertidumbres se reflejan en las grandes diferencias en la escala y la combinación de fuentes y uso de la energía, así como en la gestión del carbono en los sistemas energéticos de cero emisiones netas modelados, que resaltan las posibles oportunidades de mitigación.

## La combinación de fuentes de electricidad en los sistemas energéticos con cero emisiones netas

En modelos recientes de sistemas energéticos en los EE. UU. con cero emisiones netas, la proporción de la demanda de electricidad satisfecha por energías renovables variables —en contraposición a las fuentes fijas— variaba entre el 45 % y el 89 % según la disponibilidad de almacenamiento de energía, la transmisión y la combinación de energía solar y eólica<sup>41,42</sup>. Aunque los gerentes de redes están adquiriendo experiencia en la planificación y operación de sistemas eléctricos con grandes cantidades de generación solar y eólica, persisten las dudas sobre la proporción máxima de estos recursos que debe incluirse en sistemas descarbonizados fiables y resilientes<sup>129</sup> y los mejores enfoques para hacer frente a su variabilidad natural<sup>130</sup>. Pueden incorporarse grandes porcentajes de energías renovables variables en las redes eléctricas mediante el uso de 1) baterías, hidrógeno y otros tipos de almacenamiento de energía; 2) transmisión y transferencias interregionales de electricidad; 3) fuentes firmes de electricidad baja en carbono; y 4) mayores respuestas del lado de la demanda. Los costos y la efectividad de estos enfoques para gestionar la variabilidad difieren y están relacionados con la variabilidad espacial y temporal de los recursos solares y eólicos<sup>24,75,131,132,133,134,135,136</sup>, además de una serie de factores no relacionados con los costos (KM 32.4). Además, las fuentes de energía y las tecnologías interactuarán de forma compleja para cumplir las distintas funciones de los sistemas eléctricos (p. ej., suministrar energía, capacidad y servicios auxiliares en distintas escalas temporales), dependiendo de sus costos relativos y de los beneficios del sistema, del rigor y el diseño de las políticas, de los recursos geofísicos y las infraestructuras, de los beneficios colaterales medioambientales y de las preferencias de la sociedad<sup>55,56,137</sup>. Es necesario seguir investigando, desarrollando y demostrando tecnologías y enfoques para resolver incertidumbres, identificar sensibilidades clave y clarificar las opciones más atractivas para suministrar electricidad fiable, resistente y asequible en sistemas energéticos con cero emisiones netas (Figura 5.6).

## Combustibles alternativos para sectores difíciles de electrificar

Al igual que ocurre con la electricidad, existe una incertidumbre considerable sobre la escala y la combinación de otros portadores energéticos (p. ej., hidrógeno, bioenergía, combustibles electrónicos) que pueden ser necesarios para sectores difíciles de electrificar, como transporte de mercancías de larga distancia, aviación de larga distancia, calefacción industrial de alta temperatura y calefacción de espacios en climas muy fríos<sup>75,84,138,139,140</sup>. El hidrógeno, el amoníaco, los alcoholes y los combustibles basados en el carbono (p. ej., metano, petróleo y metanol) pueden producirse con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> (Recuadro 32.1). Sin embargo, no está claro si producir y quemar estos combustibles sería menos costoso y más sostenible que seguir utilizando combustibles fósiles y gestionar las emisiones relacionadas mediante la CCS o la eliminación de dióxido de carbono (carbon dioxide removal, CDR)<sup>62</sup>. Una vez más, la investigación, el desarrollo y la demostración de tecnologías ayudarán a revelar las dependencias y concesiones mutuas críticas y a clarificar las vías más sostenibles y costo-efectivas hacia los combustibles de emisiones netas cero.

## Recuadro 32.1 Hidrógeno

El hidrógeno es un portador energético que podría unir múltiples sectores energéticos (lo que se conoce como acoplamiento sectorial) y facilitar altas cuotas de generación variable eólica y solar en los sistemas eléctricos<sup>141,142</sup>. Múltiples procesos pueden producir hidrógeno, incluida la electrólisis, que utiliza electricidad para dividir el agua en hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) y gas oxígeno ( $O_2$ ). Estos procesos representan vínculos potenciales entre el sector eléctrico, los combustibles para el transporte y la industria y las materias primas para materiales químicos.

Algunos electrolizadores (p. ej., la membrana de intercambio de protones) también se pueden aumentar y reducir en segundos<sup>143,144</sup> para ayudar a gestionar la demanda de electricidad en sistemas energéticos con fuentes de electricidad variables<sup>142,145</sup>. Otros medios de producción de hidrógeno con bajas o nulas emisiones de  $CO_2$ , como pirólisis de metano o biomasa y reformado de metano con vapor (steam methane reforming, SMR) con captura, utilización y almacenamiento de carbono (carbon capture, utilization, and storage, CCUS)<sup>142,146,147</sup>, también pueden contribuir a la descarbonización si las emisiones de GHG del ciclo de vida pueden mantenerse bajas<sup>148,149</sup>, pero no facilitarán el acoplamiento de sectores ni actuarán como demanda flexible de electricidad.

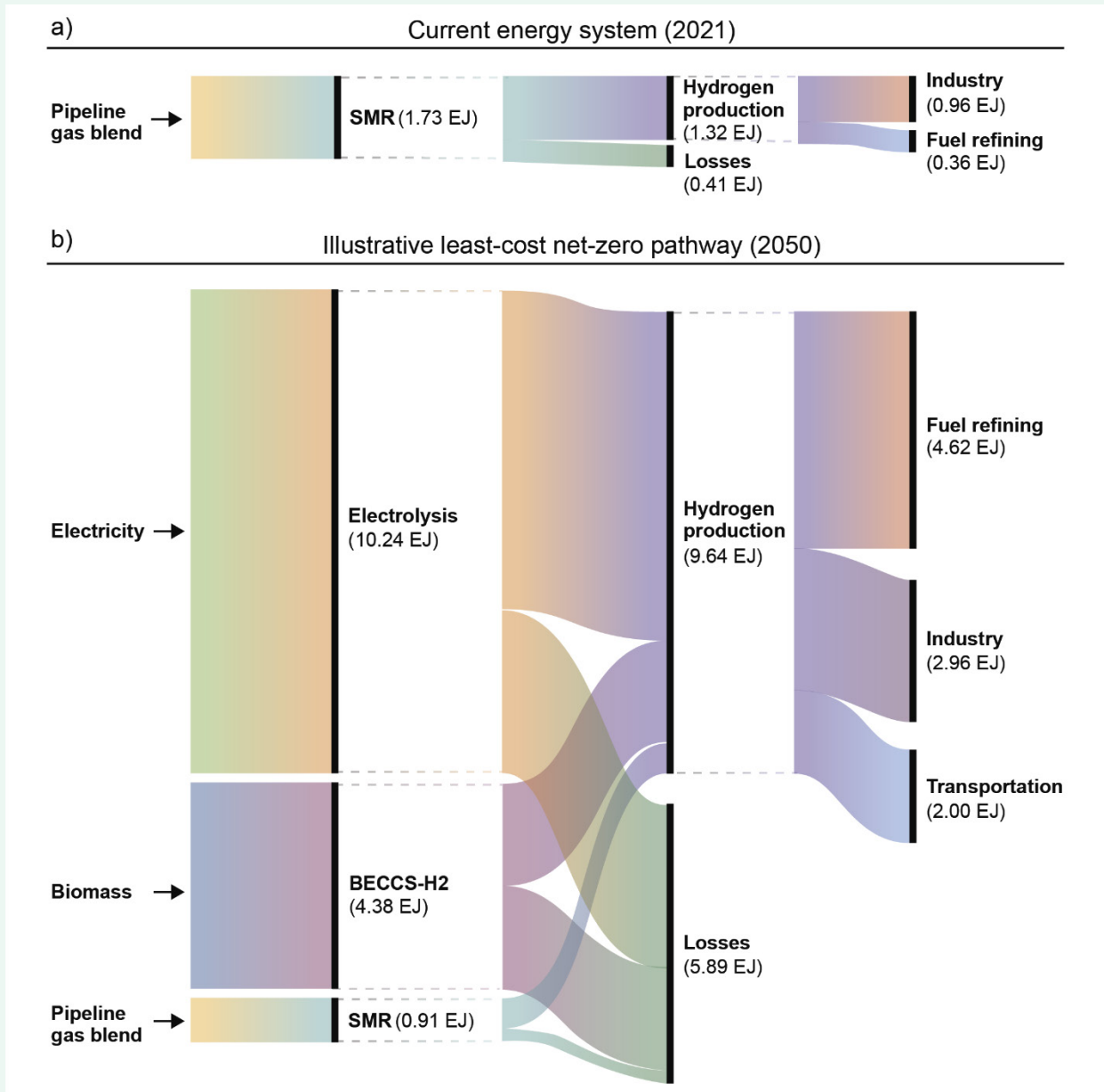
La demanda mundial de hidrógeno era de 90 Mt en 2020 y se abastecía casi exclusivamente de materias primas fósiles: 59 % por gas natural sin CCUS, 19 % por carbón, 21 % de procesos de subproductos que a menudo contienen una mezcla de otros gases y menos del 1 % de gas natural con CCUS, petróleo y electricidad cada uno (Figura 32.13)<sup>150</sup>. Los procesos petroquímicos fueron las mayores fuentes de subproductos de hidrógeno. Como reflejo de su origen fósil, la producción de hidrógeno en 2020 representó 900 Mt de emisiones de  $CO_2$ <sup>150</sup>. De todo el hidrógeno producido en 2020, el 44 % se utilizó en refinerías, el 37 % en la producción de amoníaco, el 14 % en la producción de metanol y el 6 % en la reducción directa del hierro, mientras que otras demandas representaron menos del 1 %<sup>150</sup>.

Como se señala en el análisis de los combustibles alternativos (KM 32.3), el hidrógeno puede ayudar a descarbonizar los usos finales difíciles de electrificar, como el transporte de mercancías de larga distancia y la aviación, para los que la densidad energética es fundamental<sup>74,75</sup>. Sin embargo, presurizar o almacenar hidrógeno en fase líquida para su transporte y almacenamiento añade costos adicionales y requiere pesados tanques de almacenamiento<sup>75,142</sup>. Cuando se utiliza, el hidrógeno puede oxidarse en pilas de combustible o quemarse en turbinas de gas<sup>151,152</sup> para producir electricidad (o impulso) en un bucle de conversión de energía en gas. Aunque en este bucle se pierde mucha energía, permite desplazar la electricidad en el tiempo desde el momento en que está disponible hasta el momento en que más se necesita<sup>131,134</sup>.

Un reto clave es el elevado costo actual de la producción de hidrógeno a partir de procesos con cero o bajas emisiones. El hidrógeno producido a partir del SMR que emite carbono puede costar entre \$1 y \$2.50/kg de  $H_2$  muy inferior a los más de \$4/kg de  $H_2$  que se puede conseguir con la tecnología actual de electrólisis y la energía eólica o solar<sup>153,154</sup>. El programa Hydrogen Shot del Departamento de Energía de los EE. UU. se ha fijado la meta de lograr una producción limpia de hidrógeno por \$1/kg de  $H_2$  en una década reduciendo los costos de los electrolizadores y de las energías eólica y solar (KM 5.3)<sup>153</sup>. Las fugas y la fragilización de infraestructuras que no fueron diseñadas originalmente para el hidrógeno, como los gasoductos de gas natural, también plantean problemas de seguridad<sup>142,155</sup>, la posibilidad de que aumenten los contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno, si se quema hidrógeno<sup>156,157</sup> y la influencia del hidrógeno fugitivo en el calentamiento climático<sup>158,159</sup>. Sin embargo, a bajas concentraciones, el hidrógeno puede inyectarse con seguridad en las tuberías de gas natural y utilizarse en electrodomésticos convencionales<sup>160,161,162,163,164</sup>.



### Producción de hidrógeno por fuentes y usos finales en 2021 y 2050



Los escenarios de los modelos energéticos muestran que la magnitud, las fuentes y los usos del hidrógeno cambiarán sustancialmente de aquí a 2050.

**Figura 32.13.** Las curvas de la figura muestran cómo se produce actualmente el hidrógeno (izquierda), cómo se pierde en los residuos (centro) y cómo se utiliza (derecha) (a) y en un escenario ilustrativo para 2050 (b). El grosor de las curvas representa la cantidad de hidrógeno de cada categoría. Hoy en día, la mayor parte del hidrógeno se produce mediante el reformado al vapor del gas natural (steam-methane reforming, SMR) y se utiliza en la industria química (sobre todo para fabricar fertilizantes). En el escenario descrito de emisiones netas cero, en 2050 la mayor fuente ha pasado a ser la electricidad, y el refinado de combustibles se ha convertido en el mayor uso. BECCS-H2 se refiere al hidrógeno producido a partir de materias primas de bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS); EJ = exajulio. Adaptado con permiso de Haley *et al.* 2022<sup>165</sup>.

## Gestión del carbono

La mayoría de los escenarios modelo que alcanzan las emisiones netas cero en Estados Unidos implican un uso sustancial de las tecnologías CDR, no como sustituto de la reducción de emisiones, sino para compensar las emisiones continuas de los sectores y procesos más difíciles de descarbonizar, como la aviación y la fabricación de cemento (fuentes de emisiones que pueden ser mucho más costosas de eliminar), para compensar las emisiones de GHG no energéticas y para reducir las concentraciones de GHG en la atmósfera. Sin embargo, el grado y la forma de despliegue de la CDR, incluido el equilibrio entre la captura industrial de carbono y la mejora intencionada de los sumideros naturales de carbono, siguen siendo muy inciertos y dependen de la preparación tecnológica, la economía, la aceptación pública y las consideraciones institucionales y políticas (Recuadro 32.2).

### Recuadro 32.2. Eliminación de dióxido de carbono

Los estudios de modelación más recientes sobre escenarios de emisiones netas cero en Estados Unidos proyectan de manera constante que será necesario eliminar cierta cantidad de dióxido de carbono (carbon dioxide removal, CDR) de la atmósfera para compensar cualquier emisión residual de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG)<sup>41,42</sup>. La escala de CDR requerida en estos escenarios oscila entre 0.8 y 2.9 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>; la mediana es de 1.6 Gt) en los escenarios que alcanzan cero emisiones netas de CO<sub>2</sub> netas en 2050 (Figura 32.14).

Las opciones de CDR se dividen en dos categorías en función de si mejoran la retención del CO<sub>2</sub> atmosférico por procesos biológicos o por procesos químicos, cada uno de los cuales puede desglosarse aún más según dónde se produzcan los procesos (p. ej., en tierra, en el océano o en instalaciones industriales)<sup>166,167</sup>. Los distintos enfoques tienen diferentes límites biofísicos y económicos a escala<sup>168</sup>, así como diferentes preocupaciones relacionadas con la equidad y la justicia medioambiental<sup>169,170</sup>, impactos medioambientales<sup>171</sup>, permanencia o durabilidad de la eliminación (es decir, la escala temporal de la retención y su reversibilidad)<sup>172,173,174</sup> y adicionalidad (es decir, la eliminación no se habría producido sin la intervención humana)<sup>166,175</sup>.

Los modelos energéticos actuales son relativamente simplistas en su representación de la CDR, incluido normalmente solo 1) bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS); 2) forestación/reforestación; y 3) captura directa de aire (direct air capture, DAC) industrial. Entre estos métodos, las opciones biológicas en tierra (BECCS y forestación/reforestación) son las más prevalentes en los escenarios de emisiones netas cero; la BECCS domina si se permite la retención subterránea de carbono (Figura 32.14).

La mayoría de los escenarios utilizan la DAC con moderación, debido a su costo y a los requisitos energéticos (Figura 32.14), pero estudios recientes han resaltado posibles reducciones de costos<sup>176</sup>. Las evaluaciones de las soluciones climáticas naturales sugieren que la reforestación representa la mayor oportunidad de mitigación terrestre<sup>177</sup>. Hasta 128 millones de acres de tierra en los EE. UU. son reforestables y podrían secuestrar entre 200 y 500 millones de toneladas métricas (Mt) de CO<sub>2</sub> al año<sup>178,179</sup>, si se realizan inversiones sustanciales en la cadena de suministro de la reforestación<sup>180</sup>.

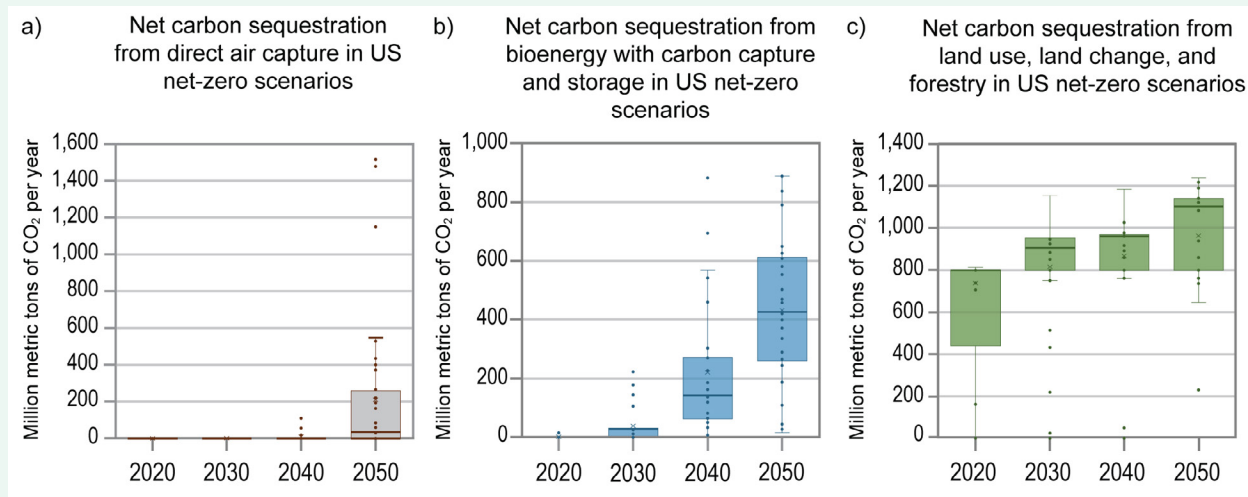
Sin embargo, se estudian otras opciones de CDR biológica que podrían ser costo-efectivas para los precios del carbono de entre \$50 y \$100/Mt de CO<sub>2</sub>: la mejora de la gestión de los pastos y pastizales podría retener entre 0.05 y 0.74 Mt de CO<sub>2</sub> por acre y año, o un total de 49-490 Mt de CO<sub>2</sub> al año, teniendo en cuenta los aproximadamente 655 millones de acres de tierras de pastoreo de Estados Unidos<sup>121,181,182,183,184</sup>. La mejora de la gestión de las tierras de cultivo (p. ej., aplicando biocarbón, cultivos de cobertura o labranza cero) podría retener entre 150 y 250 Mt de CO<sub>2</sub> en Estados Unidos cada año<sup>121,185,186,187,188</sup>. En los bosques, la ampliación de la rotación de la madera, la eliminación de la vegetación competidora y la tala selectiva podrían eliminar entre 160 y 315 Mt de CO<sub>2</sub> al año<sup>179,189,190,191,192,193,194,195,196</sup>. Por último, la rehumidificación de los humedales desecados en los EE. UU.<sup>197,198</sup> y la reconexión de las marismas saladas con el océano (lo que reduce las emisiones de metano)<sup>199</sup> podrían eliminar 9 Mt de CO<sub>2</sub> al año<sup>121</sup>. Estas opciones se analizan con más detalle en otros capítulos (KM 6.3, 9.2, 11.1; Recuadros 7.2, 30.5; enfoque en carbono azul).

Aunque menos maduro, un creciente cuerpo de investigación también se centra en la CDR marina<sup>200</sup>, lo que incluye la fertilización marina<sup>201</sup>, artificial y el cultivo de algas<sup>202</sup>, restauración marina, aumento de la alcalinidad marina<sup>203</sup> e ingeniería electroquímica (consulte, p. ej., KM 10.3).

La investigación adicional podría reducir la incertidumbre relacionada con estas estimaciones; establecer protocolos sólidos de monitoreo, notificación y verificación; y ayudar a priorizar los tipos y lugares de CDR según los beneficios colaterales y las concesiones mutuas. Un área de investigación relacionada es la respuesta del sistema terrestre a la CDR a gran escala (es decir, las emisiones negativas); cada vez hay más literatura que demuestra que emitir GHG y luego eliminarlos de la atmósfera no es lo mismo que no emitirlos en absoluto<sup>204,205,206</sup>.

La reducción de la luz solar que llega a la superficie de la Tierra, o modificación de la radiación solar (solar radiation modification, SRM), se debate a veces junto con la CDR porque ambas son intervenciones intencionadas en el sistema climático<sup>166,207</sup>. La SRM no es mitigación como se define en este capítulo; la efectividad, los costos, las concesiones mutuas medioambientales y las implicaciones geopolíticas de la SRM son inciertas, y se está investigando más sobre estos temas o puede que sea necesario (KM 17.2). Además, algunos científicos y legisladores insisten en que los riesgos de la SRM deben considerarse en el contexto de los numerosos riesgos del cambio climático continuado<sup>208</sup>.

### Escala y tipo de eliminación de dióxido de carbono en escenarios de emisiones netas cero en los EE. UU.



**Los escenarios de emisiones netas cero proyectan una eliminación sustancial de dióxido de carbono para 2050, aunque el tipo y las cantidades utilizadas en los escenarios varían considerablemente.**

**Figura 32.14.** Las eliminaciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) anual aumentan entre 2020 y 2050 en escenarios que alcanzan el cero neto en 2050, incluida la retención basada en la naturaleza en la tierra (c), la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (b) y, a partir de 2040, la captura directa en el aire (a). La mediana de retención (líneas horizontales gruesas) por uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura aumenta menos drásticamente en los escenarios. Los gráficos muestran los escenarios individuales como puntos, los rangos de los percentiles 25-75 como rectángulos y los rangos de los percentiles 10-90 como finas líneas verticales. La media de cada conjunto de escenarios se representa con una X. Créditos de la figura: University of California, Irvine.

### Cambios en los medios y comportamientos de transporte

Los cambios inciertos en la movilidad y el comportamiento de transporte podrían facilitar o dificultar la mitigación. Por ejemplo, los vehículos autónomos evolucionan rápidamente, pero aún deben superar los retos que plantean unas medidas de seguridad coherentes, la normalización de la responsabilidad tecnológica y los problemas de seguridad y privacidad<sup>209,210</sup>. Los estudios han demostrado que los vehículos autónomos podrían aumentar o disminuir el uso de energía y las emisiones de GHG en función de las condiciones de adopción y uso<sup>211,212,213</sup>. Los nuevos servicios de movilidad (p. ej., los servicios de transporte por abono mensual) se generalizan y tienen el potencial de transformar los patrones actuales de comportamiento en los desplazamientos, pero aún se enfrentan a retos de competitividad en costos y aceptación por parte de los consumidores<sup>214,215,216</sup>. Y al igual que ocurre con la automatización, estos servicios de movilidad

pueden reducir las emisiones en un conjunto limitado de condiciones (p. ej., la electrificación y los casos de uso compartido)<sup>213,217,218,219</sup>.

### Acoplamiento de sectores

La integración de las distintas partes de los sistemas energéticos, a veces denominada acoplamiento de sectores, involucra la coordinación de la planificación, las operaciones y los mercados de electricidad, combustibles y recursos térmicos para satisfacer las demandas de servicios de uso final. Vincular industrias, procesos y geografías energéticas podría abaratar costos, reducir el impacto ambiental y aumentar la fiabilidad de los sistemas energéticos con bajas emisiones de carbono<sup>75,220,221</sup>.

## Posibles oportunidades para reducir las emisiones relacionadas con la tierra

### Alimentos modernos

Innovaciones recientes pretenden aumentar las opciones alimentarias con carne vegetal y cultivada<sup>222,223,224</sup> y alimentos sintetizados químicamente sin insumos fotosintéticos<sup>225,226</sup> que pueden ser capaces de desplazar la demanda de alimentos con emisiones por caloría sustancialmente más altas. Sin embargo, los beneficios potenciales dependerán de la escalabilidad y la demanda pública de tales productos.

### Intervenciones para reducir las emisiones de metano y óxido nitroso

Existen varias opciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la agricultura cuyo potencial sigue siendo incierto. Los suplementos alimenticios para rumiantes pueden suprimir las emisiones de metano (aunque algunos de estos suplementos aún no han sido aprobados para su uso en Estados Unidos)<sup>227,228</sup>. El metano de las lagunas de estiércol puede capturarse y utilizarse para bioenergía o reducirse mediante la quema en antorcha<sup>229</sup>. Los arrozales inundados estacionalmente pueden someterse a un drenaje temporal para reducir las emisiones en un 40 % aproximadamente<sup>230</sup>. Y los cultivos pueden mejorarse para producir exudados radiculares que inhiban la nitrificación y reduzcan así las emisiones de N<sub>2</sub>O de las tierras de cultivo<sup>231</sup>.

## Mensaje clave 32.4

### La mitigación puede ser sostenible, sana y justa

Las grandes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero en los EE. UU. podrían tener beneficios sustanciales para la salud y el bienestar humanos (*confianza alta*). Se prevé que la mitigación afecte la contaminación, el uso de la tierra y de los recursos hídricos, la mano de obra y la asequibilidad, fiabilidad y seguridad de la energía y los alimentos (*confianza alta*). Una transición equitativa y sostenible hacia sistemas energéticos y alimentarios con cero emisiones netas en Estados Unidos podría ayudar a corregir legados de desigualdad, racismo e injusticia, maximizando al mismo tiempo los beneficios generales para nuestra economía y nuestro medio ambiente (*confianza alta*).

Una serie de dimensiones importantes que pocas veces se representan en los escenarios de mitigación pueden, no obstante, determinar el ritmo, la viabilidad, la probabilidad, la eficacia y la costo-efectividad de las oportunidades de mitigación.

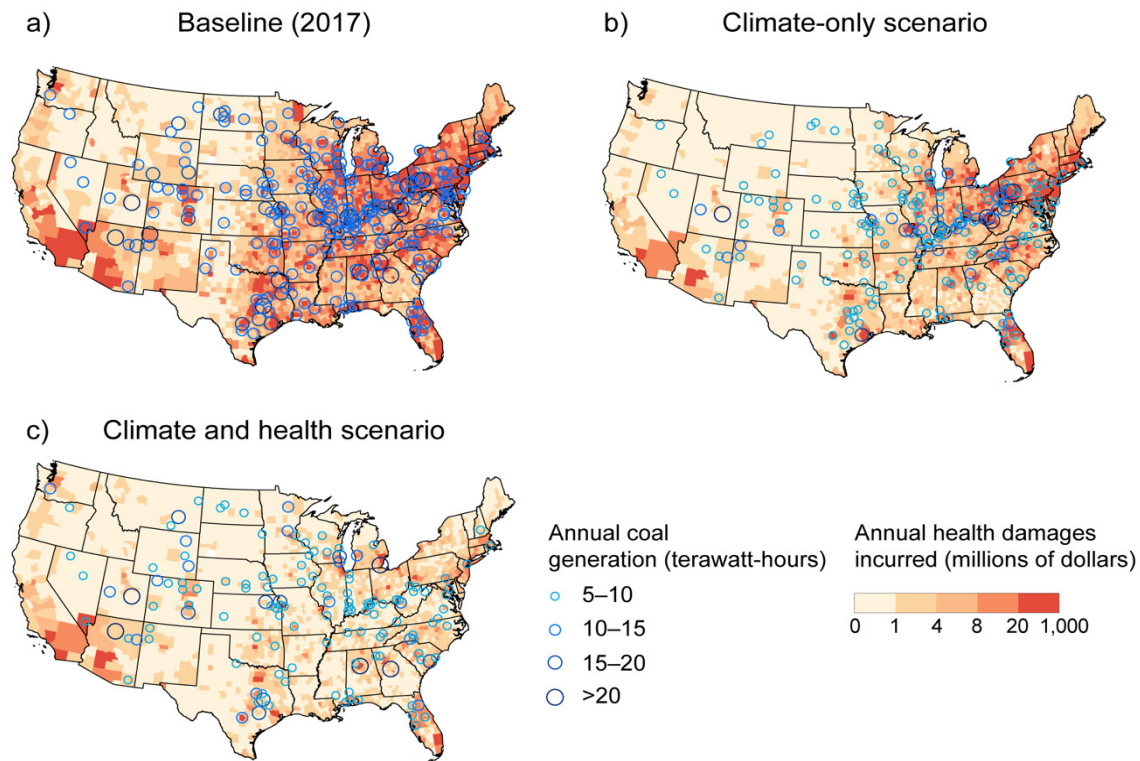
## Contaminación del aire

Los contaminantes del aire que impactan la salud humana suelen emitirse conjuntamente con los gases de efecto invernadero. La exposición a partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) y al ozono, que se encuentran entre los mayores factores de riesgo de enfermedad, causa entre 60,000 y 300,000 muertes anuales en exceso en Estados Unidos (KM 14.5)<sup>232,233,234,235,236,237,238</sup>, con efectos sobre la salud observados en concentraciones inferiores a la norma nacional actual<sup>239,240,241</sup>. Las disparidades raciales, étnicas y socioeconómicas en la exposición a la contaminación del aire están bien documentadas<sup>234,242,243,244,245,246,247</sup> y han persistido a pesar de la disminución general de la contaminación del aire<sup>234,240</sup>.

La transición a un sistema energético con cero emisiones netas puede generar importantes beneficios en materia de contaminación del aire. Las estimaciones de los beneficios netos acumulados para 2050 oscilan entre 200,000 y 2,000,000 de muertes prevenidas<sup>233,248,249,250</sup>, cuyo valor monetizado (es decir, valor estadístico) podría superar los costos totales previstos de la transición a cero emisiones netas<sup>49,251</sup>. Sin embargo, la distribución y la magnitud de los beneficios de la contaminación del aire durante el período de transición dependen del ritmo de electrificación, la selección de la tecnología y las decisiones de ubicación<sup>49,252,253,254</sup>, especialmente en lo que se refiere a la retirada de centrales eléctricas de combustibles fósiles (Figura 32.15)<sup>254,255,256,257,258,259,260</sup> y la electrificación de los vehículos<sup>261,262</sup>. Electrificación de la calefacción<sup>256,263</sup>, reducción de la producción de combustibles fósiles, electrificación del sector industrial y cambio de dietas<sup>102</sup> también pueden generar beneficios significativos en materia de contaminación del aire. Las tecnologías de captura de carbono e hidrógeno también pueden reducir las emisiones de contaminación del aire, aunque aún no está claro en qué medida.

También es posible que los esfuerzos de mitigación aumenten la contaminación del aire a escala local y regional, por ejemplo, debido al aumento de la bioenergía, la calefacción residencial con leña y la fabricación doméstica para satisfacer la demanda de materiales y productos (p. ej., Gallagher y Holloway 2020<sup>252</sup>; Commane y Schiferl 2022<sup>264</sup>).

## Beneficios colaterales para la salud de la retirada estratégica de centrales eléctricas



**El cierre de las centrales térmicas de carbón produciría beneficios tanto para la salud como para el clima.**

**Figura 32.15.** Los círculos azules muestran la ubicación y el tamaño de las centrales eléctricas de carbón en los EE. UU. en 2017 (a) y en dos escenarios: uno en el que se retira el menor número de centrales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en una cantidad fija (b) y otro en el que las centrales se retiran no solo para conseguir las mismas emisiones de CO<sub>2</sub>, sino también para evitar en la medida de lo posible los daños a la salud (c). No es sorprendente que los daños estimados a la salud (sombreado rojo) se reduzcan considerablemente en el escenario futuro que da prioridad a la salud. La generación anual de las centrales eléctricas de carbón (en teravatios-hora) y los correspondientes daños para la salud anualizados (en millones de dólares) de cada escenario se resumen por condados. La línea de base muestra los resultados según los datos de los sistemas de monitoreo continuo de emisiones de 2017, mientras que los resultados de optimización mostrados representan los escenarios de solo clima y clima más salud. Los daños para la salud se muestran por el condado en el que se producen; los cortes de la leyenda se basan en los quintiles de los datos. Aunque este análisis solo incluía el territorio continental de los EE. UU., sus conclusiones son coherentes con análisis similares realizados en otras regiones: se esperarían beneficios sustanciales para la salud de la retirada de la electricidad de carbón en cualquier lugar. Adaptado con permiso de Sergi *et al.* 2020<sup>254</sup>.

### Emplazamiento y uso de la tierra

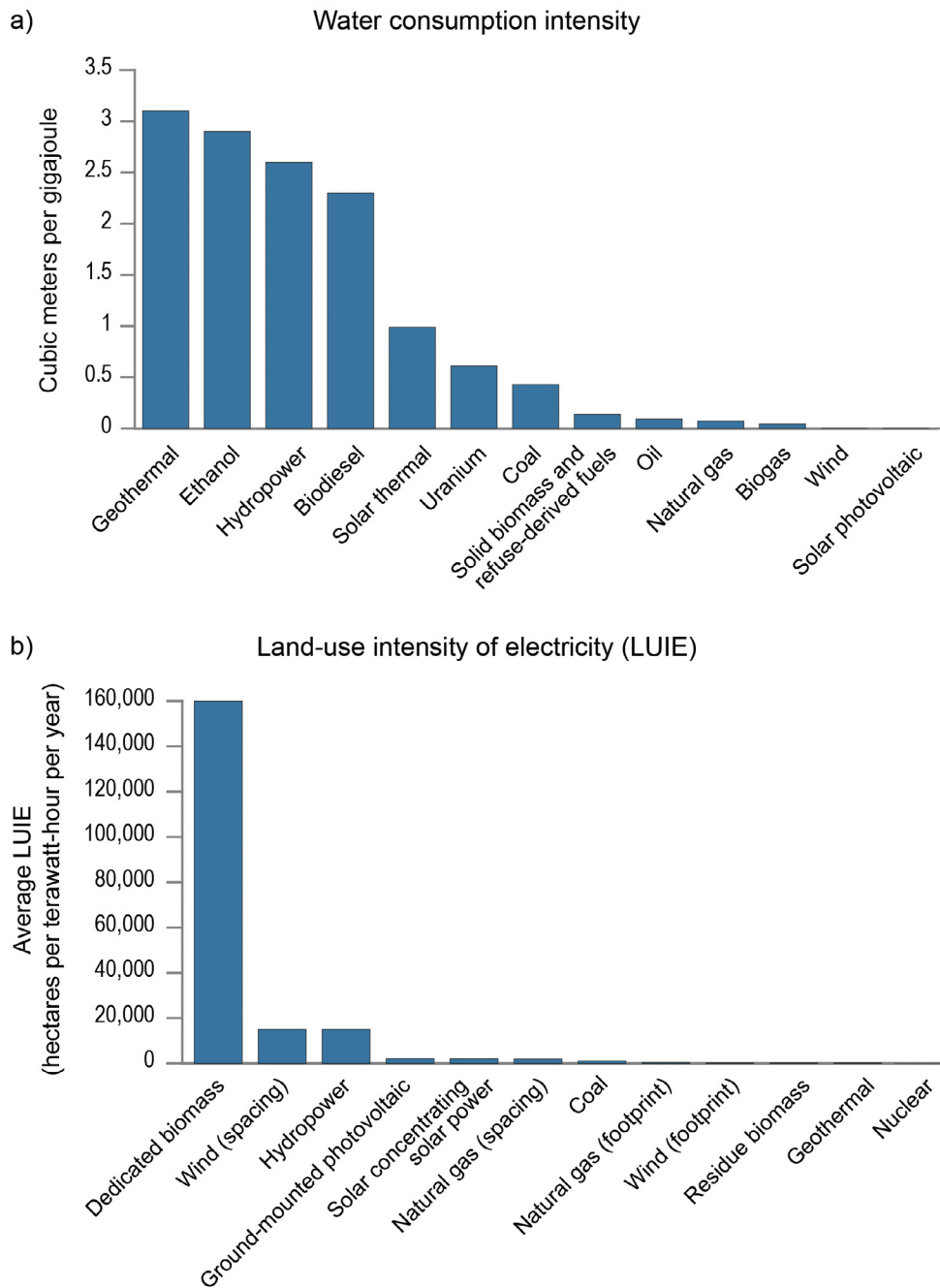
Los sistemas de energía con cero emisiones netas pueden requerir grandes extensiones de terreno, en proporción aproximada a la cuota de energía eólica y solar. El uso de la tierra acumulado en los EE. UU. para energía solar y eólica en escenarios recientes de cero neto oscila entre unos 250,000 y más de 1 millón de kilómetros cuadrados (incluye toda la superficie de parques solares y eólicos)<sup>41,42,52</sup>, concentrándose la energía solar en el Noreste y el Sureste y la eólica en el Medio Oeste, las Grandes Llanuras y Texas (KM 6.3)<sup>49</sup>. Incluso en el extremo inferior de este rango, la escala proyectada de uso de la tierra es masiva, y puede enfrentarse a la oposición pública. Por ejemplo, el impacto visual y la competencia por la tierra de sistemas tan extensos tendrían que ganarse y mantener el apoyo de muchas comunidades; esto ha sido reciente-

mente un reto en la ubicación de proyectos solares y eólicos<sup>265,266</sup>. El emplazamiento y la demostración de otras infraestructuras, independientemente de la huella que dejen, pueden plantear problemas similares, como la nueva transmisión de electricidad<sup>265</sup>, CCS<sup>267</sup> y CDR<sup>268</sup>. Otros expresan su preocupación por los posibles impactos medioambientales de los parques solares y eólicos, como el cambio de la cubierta vegetal, la pérdida de hábitats vegetales y animales, los obstáculos a la migración y la muerte por colisión de aves y murciélagos<sup>269,270,271</sup>, así como la competencia por la tierra entre la agricultura y las energías renovables<sup>272</sup>. En particular, la competencia con la agricultura también ha sido durante mucho tiempo una preocupación en torno a la bioenergía, que podría aliviarse si disminuye la demanda de etanol de maíz debido a la electrificación del transporte<sup>273,274</sup>. Así pues, los investigadores han empezado a desarrollar vías que tienen en cuenta algunas de estas preocupaciones y limitaciones<sup>49,275</sup>, así como a identificar cambios en la gobernanza y el derecho administrativo que puedan contribuir a agilizar los procesos de selección de emplazamientos<sup>276</sup>; sin embargo, el emplazamiento puede ser un obstáculo clave para los sistemas de emisiones netas cero basados en energías renovables<sup>277</sup>. El compromiso con los grupos comunitarios y las partes interesadas en una fase temprana del proceso de planificación puede reducir los retrasos y las cancelaciones de los proyectos<sup>278</sup>.

### Uso del agua

Las necesidades de agua de los sistemas energéticos con cero emisiones netas podrían ser inferiores al consumo actual<sup>279</sup>, en gran medida porque los eólicos y los solares requieren poca agua (Figura 32.16; KM 5.1)<sup>280,281,282,283</sup>. Sin embargo, algunos procesos de conversión energética y gestión del carbono, como la electrólisis para la producción de hidrógeno, la síntesis química de hidrocarburos (p. ej., mediante el proceso Fischer-Tropsch) y la CCS, requieren mucha agua y podrían compensar el ahorro de agua derivado del cambio de combustible. En última instancia, el uso del agua (y la calidad relacionada) y las necesidades temporales y de localización dependen en gran medida de la combinación de recursos y procesos utilizados para alcanzar las emisiones netas cero<sup>284,285,286</sup>.

### Requisitos en cuanto a tierra y agua de las fuentes de energía



Las distintas fuentes de energía implican un mayor o menor uso del agua y de la tierra.

**Figura 32.16.** Las barras representan la intensidad del consumo de agua (a) y la intensidad de electricidad en el uso de la tierra (land-use intensity of electricity, LUIE) para los EE. UU. en 2014 (b) en relación con diferentes fuentes de electricidad. La eólica y la solar utilizan menos agua que cualquiera de las otras fuentes de energía, pero más superficie terrestre que las fuentes nucleares, geotérmicas o fósiles. (a) Adaptado con permiso de Grubert y Sanders 2018<sup>280</sup>; (b) adaptado de Lovering et al. 2022<sup>287</sup> [CC BY 4.0].



## Trabajo

La productividad, la oferta y la disposición de la mano de obra, además del discurso nacional y el apoyo y la preocupación a nivel comunitario en relación con la mano de obra, tienen el potencial de acelerar o limitar los esfuerzos de mitigación. Casi 8 millones de estadounidenses trabajaban directamente en empleos relacionados con la energía en 2021, lo que representa aproximadamente el 5 % de la población activa total<sup>288,289</sup>. De esos 8 millones de empleos relacionados con la energía, aproximadamente el 41 % se encontraban en zonas alineadas con emisiones netas cero en 2022<sup>290</sup>. Los empleos relacionados con la energía tienden a concentrarse geográficamente en determinados estados y comunidades (Figura 32.17). Más del 10 % de la población activa de 150 condados (de 3,142) está empleada directamente en trabajos relacionados con la energía<sup>288,291,292</sup> —a menudo la producción de carbón, petróleo y gas—, pero el empleo en actividades relacionadas con la mitigación está creciendo y ya es elevado en muchos condados (p. ej., eficiencia energética en Vermont, instalaciones eólicas en las Grandes Llanuras del Sur; KM 26.2).

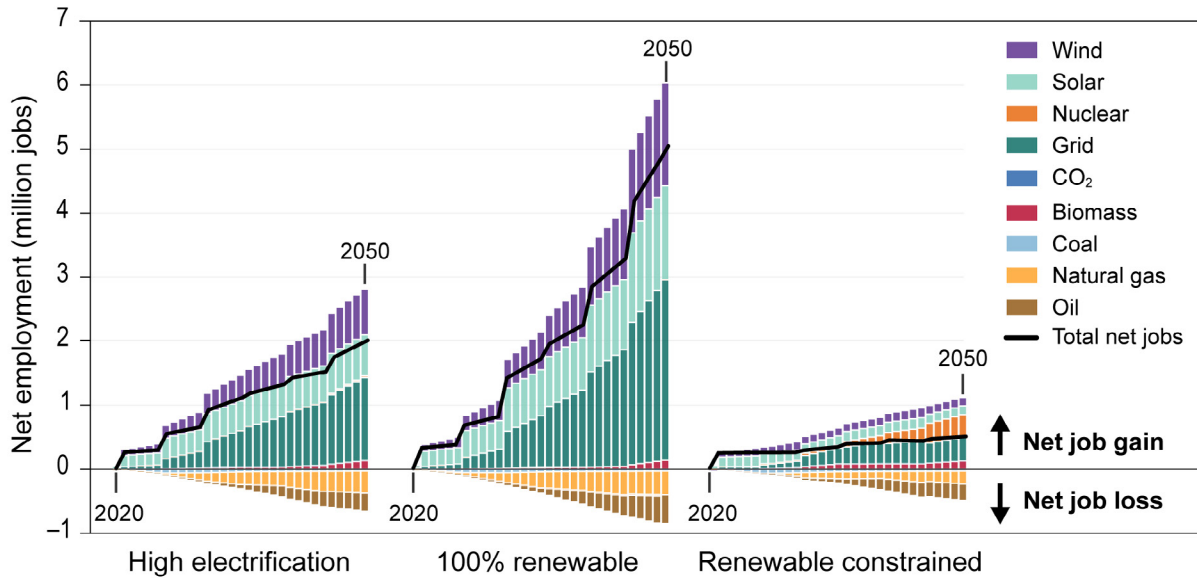
Alcanzar las emisiones netas cero en Estados Unidos en 2050 generaría puestos de trabajo relacionados con la fabricación y el despliegue de nuevas infraestructuras, pero reduciría los empleos relacionados con los combustibles fósiles<sup>293</sup>. Muchos análisis concluyen que las pérdidas de empleo y salarios en los sectores de los combustibles fósiles se compensarían totalmente (en conjunto) con los aumentos en las industrias de recursos con bajas emisiones de carbono<sup>293,294,295,296,297</sup>. El número y la distribución local de los puestos de trabajo relacionados con la mitigación dependerán de la combinación final de fuentes de energía, las decisiones de ubicación e inversión, las limitaciones de la oferta de mano de obra, el alcance de la fabricación nacional y la negociación política; sin embargo, la descarbonización podría ocasionar una expansión a largo plazo de la mano de obra del sector energético en la mayoría de los estados, incluso si se tiene en cuenta el aumento de la productividad de los trabajadores (que suele ser un supuesto subyacente en las proyecciones de costos tecnológicos). Los programas de desarrollo de la mano de obra a gran escala y sostenidos, las prácticas y políticas laborales de alto nivel y el correspondiente apoyo federal podrían acelerar la transición hacia las emisiones netas cero<sup>293,298</sup>.

Sin embargo, ya hay evidencia de dificultades de contratación en los mercados laborales del sector energético<sup>291</sup>, lo que presagia cuellos de botella en la oferta de mano de obra en ausencia de políticas que la contrarresten. Aunque existe un apoyo público a los beneficios laborales relacionados con la mitigación del cambio climático<sup>294</sup>, también existe evidencia de desconfianza asociados a las narrativas históricas de creación de empleo relacionado con la energía<sup>299</sup>. Además, existen disparidades raciales y de género en la mano de obra del sector energético<sup>291</sup>.

Mientras tanto, a pesar de la política y el discurso político sobre transiciones justas para los trabajadores de los combustibles fósiles<sup>294,300,301</sup>, muchas comunidades dependientes de los combustibles fósiles han experimentado grandes descensos en el empleo<sup>26,302,303</sup>. Además, extrabajadores del sector de los combustibles fósiles a menudo se trasladan porque sus habilidades no siempre son transferibles a otras industrias locales, y las comunidades cercanas pierden ingresos fiscales que sustentan infraestructuras públicas y servicios sociales (KM 26.2)<sup>304,305</sup>. De cara al futuro, las políticas nacionales que tengan en cuenta cuándo y dónde la mano de obra de las industrias energéticas en declive podría ocupar nuevos puestos de trabajo en sectores energéticos emergentes (p. ej., cadenas de suministro de gas natural y captura de carbono, minería del carbón y fabricación de energía solar) tienen el potencial de moderar los cuellos de botella en la oferta de mano de obra, el desempleo concentrado y los ciclos de auge y caída de las bajas emisiones de carbono. Cuando haya flexibilidad en la ubicación de las infraestructuras y la asignación de fondos, estos fondos también podrían aprovecharse para conseguir apoyo político y distribuir de forma más equitativa los costos y los beneficios. Por ejemplo, las disposiciones de la Ley de Reducción de la Inflación de 2022 ofrecen créditos fiscales mejorados a los proyectos de energía limpia que pagan salarios predominantes a los trabajadores y utilizan aprendices registrados<sup>290</sup>, que fabrican y abastecen de materiales internamente<sup>306</sup> o que

están ubicados en “comunidades energéticas” definidas por umbrales en la proporción de empleos relacionados con los combustibles fósiles<sup>307</sup>.

### Empleo en el sector de la energía de 2020 a 2050 para vías alternativas de producción neta cero



Se proyecta que el cambio hacia las energías renovables aumente el número total de puestos de trabajo en el sector energético.

**Figura 32.17.** A pesar de la disminución del número de empleos relacionados con los combustibles fósiles, se proyecta que el número total de empleos en el sector de la energía (específicamente los relacionados con el suministro de energía) aumente en general en los escenarios energéticos de emisiones netas cero entre 2020 y 2050, aunque mucho más en unos escenarios que en otros. Estos escenarios particulares proceden de Larson *et al.* 2021<sup>49</sup> y abarcan una gama de futuros energéticos en los que casi todos los edificios y el transporte están electrificados pero no hay restricciones (a), las energías renovables producen el 100 % de la energía (b) o las renovables producen mucha menos energía y predominan la energía nuclear y fósil con captura y almacenamiento de carbono (c). CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono. Adaptado con permiso de Jenkins *et al.* 2021<sup>308</sup>.

### Equidad energética y justicia medioambiental

Las desigualdades sociales en Estados Unidos tienen su origen en prácticas discriminatorias sistémicas, como la negación de servicios financieros, que marginan a las comunidades por motivos raciales o socioeconómicos. La equidad social abarca varios aspectos relacionados con la energía y el clima de reconocimiento, procedimiento y justicia distributiva (KM 23.4, 27.3)<sup>309,310</sup>. En el contexto de la toma de decisiones en materia de energía y clima, la justicia de reconocimiento se refiere a la comprensión de que determinadas personas y grupos soportan actualmente, y han soportado históricamente, cargas dispares relacionadas con nuestros sistemas energéticos colectivos y, por lo tanto, pueden requerir recursos adicionales o esfuerzos de mitigación. La justicia procesal tiene en cuenta quién está involucrado y tiene influencia en los procesos de toma de decisiones sobre energía y clima, con la meta de garantizar que aquellos que quieren ser incluidos en estos procesos —y especialmente aquellos que se verán afectados por los resultados— participen de manera significativa a través de procedimientos justos e inclusivos (consulte, p. ej., KM 30.3 sobre mitigación informada por el conocimiento indígena). La justicia distributiva se refiere a la asignación de beneficios y cargas en función de la geografía y la sociodemografía, con el objetivo de que ninguna población reciba una

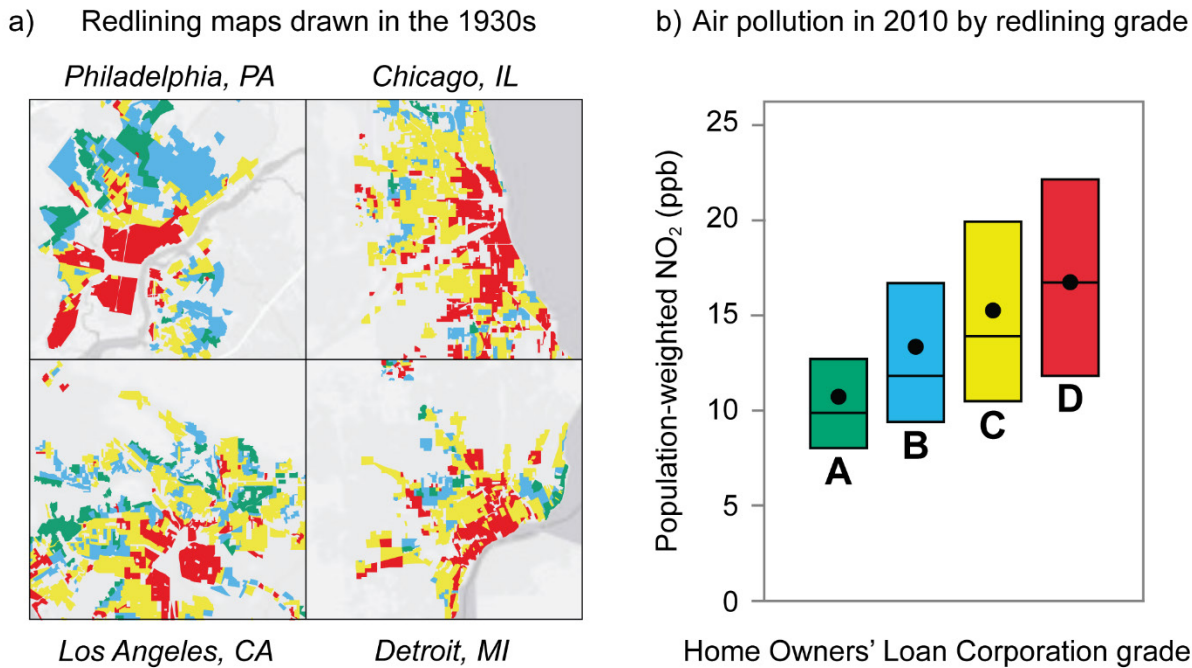
parte desproporcionada de los daños energéticos o climáticos (p. ej., la contaminación del aire relacionada con la energía; KM 14.3) o de los beneficios (p. ej., el acceso a tecnologías energéticas eficientes y bajas en carbono o a empleos de tecnología limpia).

Las cargas desproporcionadas para la salud pública de los sistemas energéticos en las comunidades de color o de bajos ingresos, como las derivadas de las emisiones de los vehículos y las centrales eléctricas, han sido ampliamente documentadas (Figura 32.18)<sup>311,312,313,314</sup>. La inseguridad energética (p. ej., tener dificultades para pagar las facturas de energía) también afecta de forma desproporcionada a los hogares con bajos ingresos, a las comunidades de color, a las comunidades rurales e indígenas, a las familias con niños y a los adultos mayores (Capítulo 16)<sup>313,315,316,317,318,319,320</sup>. Esta carga desproporcionada de inseguridad energética refleja que los estadounidenses de raza negra, por ejemplo, tienen más probabilidades de vivir en casas más antiguas que son menos eficientes energéticamente<sup>317,318,321</sup>. Además, las zonas negadas de servicios financieros suelen carecer de árboles y espacios verdes que mitiguen el efecto isla de calor urbano y, por tanto, experimentan temperaturas estivales más altas que las zonas urbanas circundantes<sup>322,323,324</sup>, lo que a su vez aumenta la demanda de energía y las cargas<sup>325</sup> y hace que los residentes sean más susceptibles a los efectos adversos para la salud del calor extremo (KM 15.3)<sup>325,326</sup>.

Aunque los impactos medioambientales y la inseguridad energética no se soportan de forma proporcional en todos los grupos sociales, es posible buscar opciones de mitigación que también reparen las injusticias actuales e históricas. Por ejemplo, las comunidades de bajos ingresos y las de color podrían experimentar mejoras desproporcionadas en la contaminación del aire<sup>251,259</sup>. Las consideraciones de equidad energética también incluyen el acceso a servicios energéticos suficientes<sup>327,328</sup>, así como la reducción de la carga energética o la pobreza energética<sup>321,329,330</sup> y los costos iniciales de la eficiencia energética y las tecnologías con bajas emisiones de carbono<sup>331</sup>. Los esfuerzos de mitigación que aumenten la disponibilidad y asequibilidad de los servicios energéticos (incluidas las temperaturas seguras y confortables) podrían mejorar los resultados de la equidad energética. Por ejemplo, la mejora de la eficiencia térmica de los edificios reduciría los costos energéticos y ayudaría a mantener temperaturas térmicas interiores seguras en ausencia de aire acondicionado funcional<sup>332</sup>.

Los estudios han revelado que las tecnologías eficientes y con bajas emisiones de carbono (p. ej., vehículos eléctricos, paneles solares, baterías de almacenamiento y bombillas LED) tienden a pertenecer de forma desproporcionada a los hogares con mayores ingresos, con más formación académica y de raza blanca, que son los que reciben los incentivos financieros<sup>311,312,313,333</sup>. Las oportunidades laborales en el sector de las energías limpias también han tendido a excluir a mujeres y personas de color<sup>334</sup>. Además, en la medida en que la mitigación aumente los costos energéticos, más hogares experimentarán pobreza energética y las desigualdades energéticas pueden empeorar<sup>335,336</sup>. Además, los cambios en el tipo, el momento y el costo de la energía necesaria para proporcionar temperaturas seguras y confortables bajo el cambio climático y los patrones de electrificación anticipados pueden exacerbar los riesgos para la salud, las cargas financieras de la energía y otras medidas de equidad energética<sup>327,335</sup>.

## Calidad del aire desigual en vecindarios históricamente negados de servicios financieros



**Las comunidades que sufrieron la negación de servicios financieros en los años 30 del siglo XX sufren hoy más contaminación del aire.**

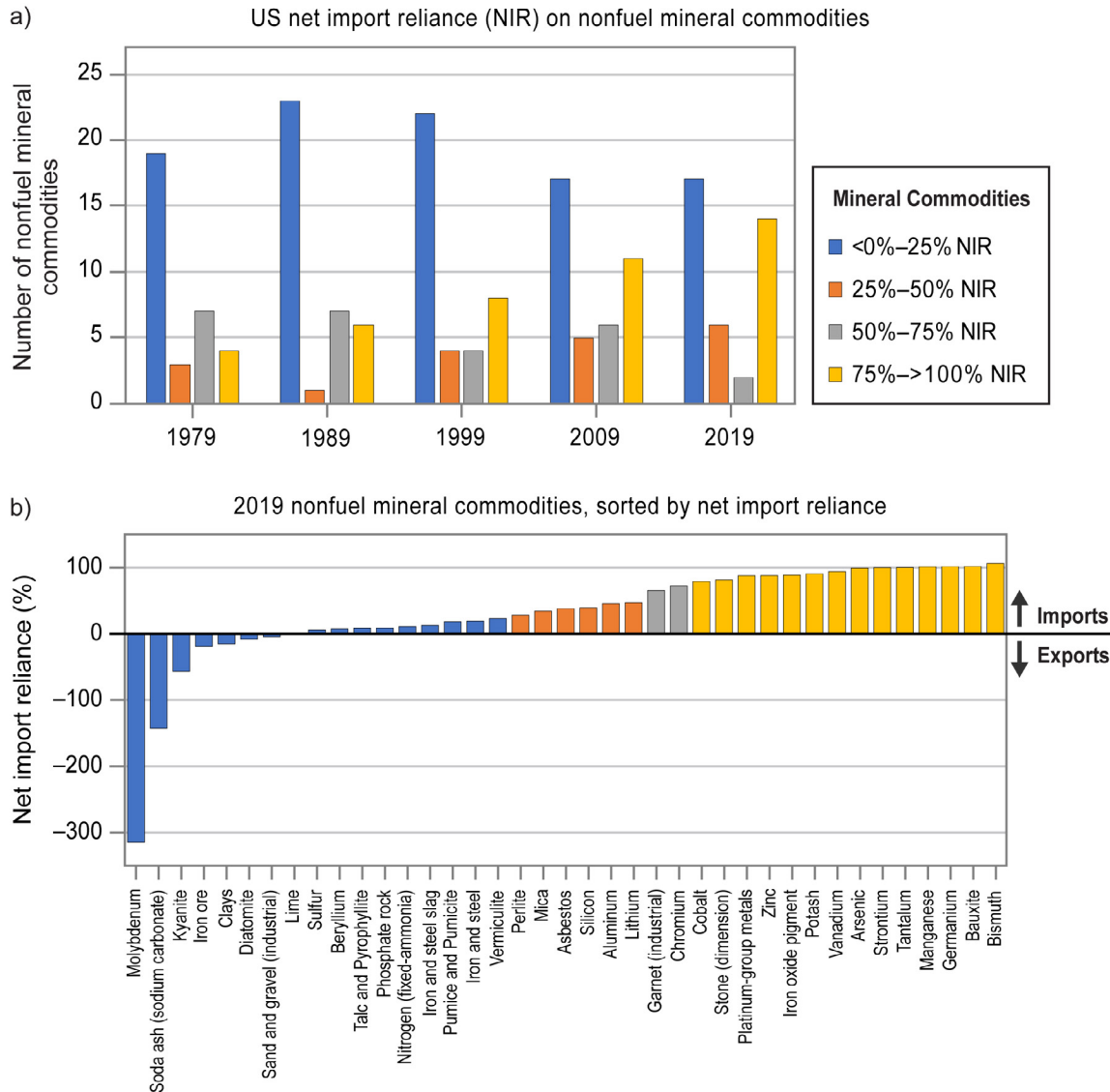
**Figura 32.18.** Las calificaciones de la Home Owners' Loan Corporation (HOLC) (A ["la mejor"], B, C y D ["peligrosa", es decir, negación de servicios financieros]) de la década de los años 30 del siglo XX (que efectivamente negaban de hecho a los grupos negros y minoritarios el acceso a las instituciones crediticias) seguían correspondiendo a mayores niveles de contaminación del aire en 2010. Panel (a) muestra mapas de negación de servicios financieros de vecindarios de cuatro ciudades de EE. UU. basados en las clasificaciones de grado de la HOLC de los años 30 del siglo XX. Panel (b) muestra la distribución ponderada por población del nivel de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) (medido como concentración en partes por mil millones [parts per billion, ppb]) para 2010 a través de 202 sectores de la población en los EE. UU. contiguos. Las líneas horizontales indican las medianas; los puntos, los promedios; y las barras, los percentiles de 25 a 75. Adaptado con permiso de Lane *et al.* 2022<sup>314</sup>.

### Cadenas de suministro, seguridad energética y geopolítica

Los esfuerzos de mitigación del cambio climático pueden aumentar drásticamente la demanda nacional y mundial de productos (p. ej., energía solar fotovoltaica, baterías, motores eléctricos y turbinas eólicas) y de recursos metálicos y minerales (p. ej., litio, níquel, cobalto y cobre), lo que puede tener implicaciones para la seguridad del suministro, los mercados, la fabricación avanzada (p. ej., robótica y los EV), la geopolítica y la minería (enfoque en los riesgos para las cadenas de suministro)<sup>337,338,339,340</sup>. Además, en Estados Unidos hay actualmente 50 minerales críticos incluidos en la lista (frente a los 35 de 2018)<sup>341,342</sup>, definidos como aquellos esenciales para la seguridad económica o nacional y cuyas cadenas de suministro son vulnerables a las interrupciones (Figura 32.19). Con el aumento de la demanda a medida que el sistema se descarboniza, podría haber escasez a corto plazo de varios minerales y metales. Note que una serie de órdenes ejecutivas se anticipan a este desafío e instan a monitorear y reducir la dependencia de los EE. UU. de materiales críticos importados, por ejemplo, mediante un mayor reciclaje (p. ej., el Decreto Ejecutivo 13817, "Estrategia federal para garantizar el suministro seguro y fiable de minerales esenciales"<sup>343</sup>, y el Decreto Ejecutivo 13953, "Abordar la amenaza que supone para la cadena de suministro nacional la dependencia de minerales críticos de adversarios extranjeros y apoyar a las industrias mineras y de procesamiento nacionales"<sup>344</sup>) y cadenas de

suministro más resilientes en general (Decreto 14017, “Las cadenas de suministro en los EE. UU.”<sup>345</sup>; consulte también enfoque en los riesgos para las cadenas de suministro; KM 17.2, 18.1).

### Mayor dependencia de minerales no combustibles importados



### Estados Unidos depende cada vez más de la importación de minerales.

**Figura 32.19.** Panel (a) muestra que Estados Unidos se ha vuelto cada vez más dependiente de las importaciones de 39 materias primas minerales no combustibles desde 1979; las materias primas de las que se importa entre el 75 % y el 100 % (barras amarillas) aumentan en número, y las materias primas de las que se importa menos del 25 % (barras azules) disminuyen en número. Panel (b) muestra los productos básicos específicos y el grado de dependencia de las importaciones para cada uno en 2019. Créditos de las figuras: (a) adaptado de Fortier et al. 2015<sup>346</sup>; (b) University of California, Irvine.

## Mensaje clave 32.5

### Gobiernos, organizaciones y particulares pueden actuar para reducir las emisiones

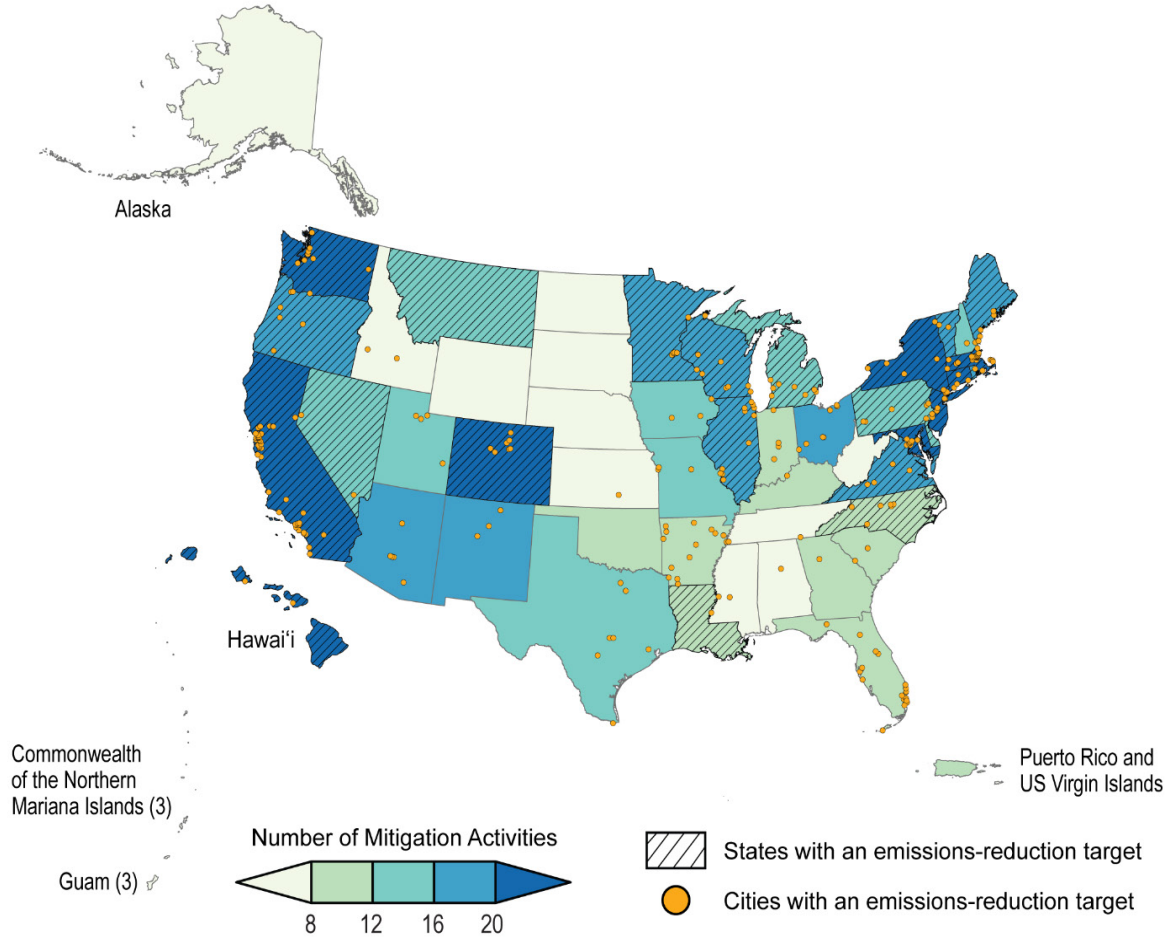
Los esfuerzos de mitigación pueden ser apoyados por una variedad de actores y acciones, desde las elecciones hechas por las personas hasta las decisiones tomadas por las empresas y los gobiernos locales, tribales, estatales y nacionales (*confianza alta*). Entre las acciones con un potencial significativo a corto plazo se encuentran las políticas sectoriales que aceleran el despliegue de tecnologías bajas en carbono, los esfuerzos a nivel urbano para promover el transporte público y mejorar la eficiencia de los edificios y los cambios de comportamiento individuales para reducir la demanda de energía y el consumo de carne (*confianza alta*).

Un amplio abanico de actores de todo Estados Unidos ha estado involucrado en los esfuerzos para acelerar la transición hacia una energía limpia y mitigar las emisiones de GHG, como nueva legislación; reglas, normativas y decretos ejecutivos; y acciones voluntarias. Por ejemplo,

- en el marco del Acuerdo de París, Estados Unidos se ha comprometido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 50 % y un 52 % en 2030 con respecto a 2005;
- a través de la Ley Bipartidista de Infraestructuras y la Ley de Reducción de la Inflación y los programas pertinentes, existen subvenciones federales para las empresas de energías limpias y para la compra doméstica de vehículos eléctricos y bombas de calor<sup>347</sup>;
- 25 estados<sup>348</sup>, 675 ciudades, 300 universidades y cientos de empresas han anunciado objetivos de emisiones netas cero; y
- las coaliciones ascendentes, como la iniciativa America Is All In, cuentan con el apoyo de líderes subnacionales que representan a más de la mitad de la población de los EE. UU. (consulte, p. ej., KM 21.4 y 30.3).

Desde 2018, el número total de actividades de mitigación a nivel estatal ha aumentado un 83 %, y 169 ciudades más han presentado objetivos de reducción de emisiones desde entonces (Figura 32.20; consulte también Capítulo 12)<sup>349</sup>.

## Actividades relacionadas con mitigación en estados y ciudades

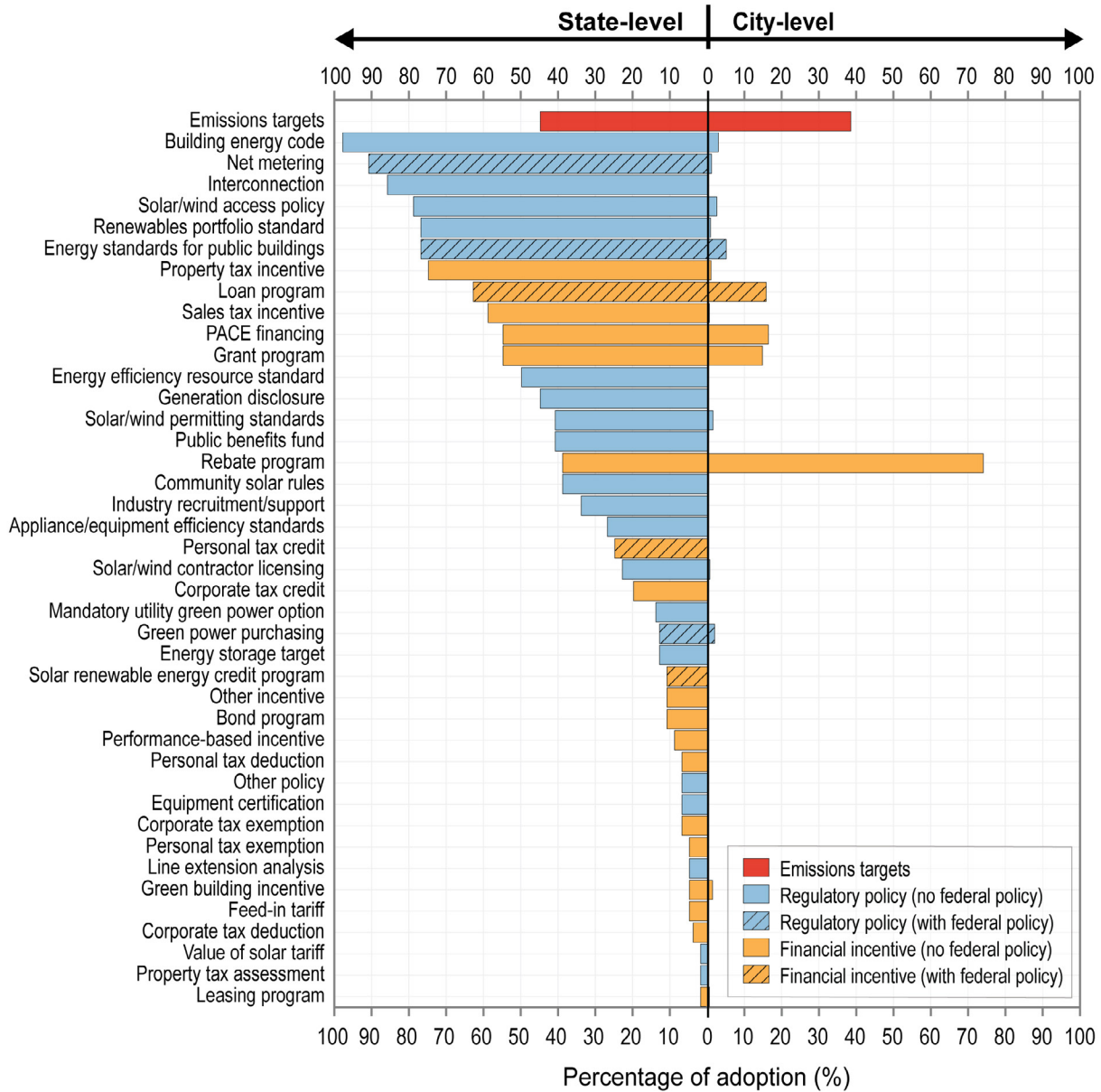


### Muchos estados y ciudades han tomado medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Figura 32.20.** El sombreado indica el número de actividades de mitigación adoptadas por cada estado, y los círculos naranjas indican las ciudades con objetivos de reducción de emisiones (en abril de 2023). Prácticamente todas las regiones han tomado medidas, con focos de actividad en el Noreste, Suroeste, Colorado, Hawái y la Costa Oeste. Consulte la Figura 32.21 para ver ejemplos de los tipos de medidas adoptadas. Créditos de la figura: The Pennsylvania State University, NOAA NCEI y CISESS NC.

Las vías para alcanzar estas metas suelen incluir un amplio conjunto de medidas y políticas, incluidas inversiones en infraestructuras y tecnologías limpias que requerirán un capital considerable, respaldo financiero y asignación de recursos. La viabilidad y el impacto de estas medidas dependen de factores locales y regionales, que a menudo se reflejan en objetivos y acciones de mitigación más granulares y específicos de cada sector o economía (consulte la Figura 32.21)<sup>350</sup>.

### Tasa de adopción de diversas formas de instrumentos políticos y de acción por el clima



#### Los estados y las ciudades han adoptado una variedad de medidas y políticas climáticas.

**Figura 32.21.** Las barras muestran los porcentajes de estados (izquierda) y ciudades (derecha) que han anunciado objetivos de emisiones (rastreados por el conjunto de datos de la Zona de Actores No Estatales para la Acción Climática de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) o adoptado las políticas de energía limpia seleccionadas (rastreadas en el conjunto de datos de la Base de Datos de Incentivos Estatales para las Energías Renovables y Eficiencia de la Universidad Estatal de Carolina del Norte) en abril de 2023. El color de las barras indica el tipo de política, y el rayado denota que la acción política también es adoptada o anunciada por el gobierno federal. PACE significa Programa de Evaluación de Energía Limpia en una Propiedad (Property Assessed Clean Energy, PACE). Créditos de la figura: The Pennsylvania State University, NOAA NCEI y CISESS NC.

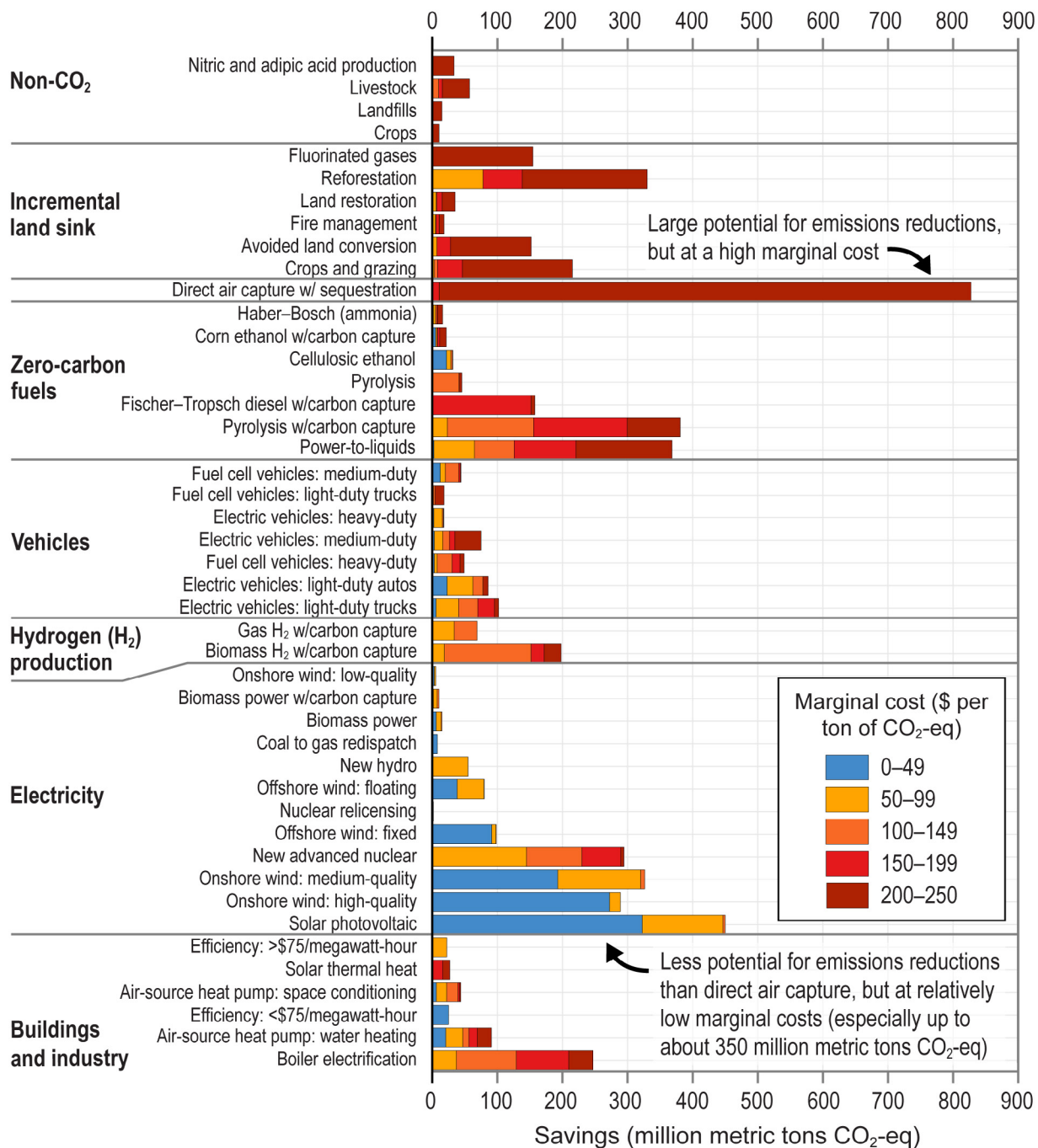


Con este fin, casi 40 estados han establecido normas de cartera de renovables metas voluntarias de energía renovable, que orientan y codifican aún más los esfuerzos de descarbonización dentro del sector energético e inducen cambios graduales hacia una mayor penetración de la electricidad renovable (KM 32.1). Del mismo modo, más de 30 gobiernos locales han promulgado requisitos de eficiencia energética, que van desde códigos de construcción y ordenanzas de evaluación comparativa hasta el establecimiento de normas de rendimiento (consulte, p. ej., KM 12.3). Con las normas federales de ahorro promedio corporativo de combustible (corporate average fuel economy, CAFE) para los vehículos, los esfuerzos del sector del transporte local se centran a menudo en metas de cambio de modo de comportamiento, como la promoción de opciones de transporte limpio y público y la reducción de las millas recorridas en vehículo. La propuesta de Ley Federal de Resiliencia Agrícola está diseñada para abordar las necesidades de adaptación de los agricultores y consumidores en los EE. UU. como consecuencia de un clima cambiante, así como para reducir las emisiones asociadas a la producción agrícola<sup>351</sup>. Además, la Comisión de Bolsa y Valores está en el proceso de finalizar nuevas reglas que obligarían a las empresas públicas a revelar las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con sus operaciones y cadenas de suministro, así como los riesgos climáticos para su negocio<sup>352</sup>. Estas reglas se basarían en los esfuerzos voluntarios de información y reducción realizados por las empresas en el marco del Proyecto de Divulgación del Carbono, la iniciativa de Objetivos Basados en la Ciencia y los marcos Medioambientales, Sociales y de Gobierno Corporativo y deberán apoyarse en protocolos de contabilidad mejorados y en investigaciones científicas específicas<sup>174,353,354,355,356</sup>.

Más allá del establecimiento de metas y la implementación de medidas reguladoras, la habilitación de mecanismos financieros suele ser un elemento central de la estrategia de mitigación. Los programas regionales de limitar y negociar utilizan un sistema de responsabilidad y rendimiento para incentivar la reducción de emisiones a nivel de generación eléctrica. Mientras tanto, las subvenciones federales, como las concedidas a las empresas de energías limpias y los créditos fiscales para la compra de vehículos eléctricos, pueden reforzar el cambio de comportamiento<sup>54</sup>. Al facilitar el acceso al capital financiero —ya sea en los sectores público, comercial o residencial—, las inversiones en infraestructuras y en el entorno construido, así como en investigación y desarrollo, pueden impulsar aún más estos avances.

Las estrategias de mitigación disponibles varían en términos de potencial de reducción de emisiones y costos (Figura 32.22), así como en implicaciones medioambientales, técnicas y sociales (Figura 32.23). Sin embargo, con el avance de las tecnologías de medición y los conocimientos obtenidos del despliegue de diversas medidas adoptadas en entornos muy diferentes, ahora hay más evidencia empírica para informar el diseño de estrategias para una comunidad determinada (consulte los capítulos regionales para ver ejemplos de acciones de mitigación estatales, de las ciudades, comunitarias y tribales; p. ej., Recuadro 21.1; KM 30.3). Además, cada vez más jurisdicciones adoptan enfoques comunitarios y holísticos para la planificación de la acción climática, al incorporar prácticas que abordan el acceso equitativo a la información (incluso consideraciones sobre los idiomas utilizados y el acceso a internet) y a los eventos (como vales de transporte, provisiones de alimentos y cuidado de niños, y el pago por conocimientos especializados a miembros de la comunidad con experiencia vivida), con la meta de mejorar y aumentar la capacidad y la habilidad para influir en la toma de decisiones y, en última instancia, ayudar a los líderes electos a tomar las decisiones mejor informadas y más impactantes para sus comunidades particulares<sup>357,358,359</sup>.

### Reducciones potenciales de emisiones por acción para el año 2050

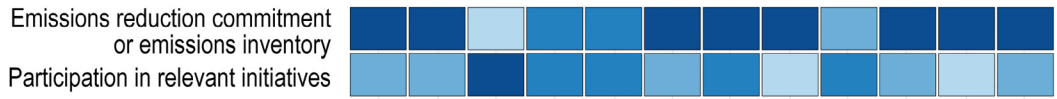


La magnitud y el costo de la reducción de las emisiones dependen de las tecnologías disponibles y de la fuente de las emisiones correspondientes.

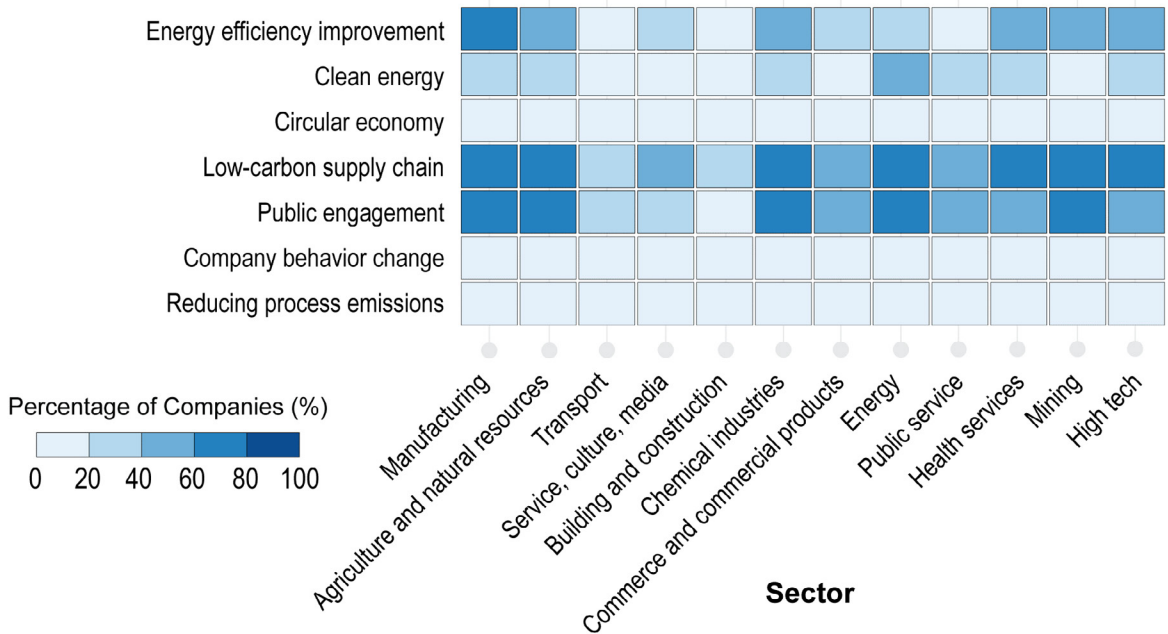
**Figura 32.22.** Sistema energético, sector terrestre y emisiones distintas del CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) para el año 2050 junto con los costos marginales estimados, excluido el impacto de los incentivos políticos. La suma de las opciones de mitigación mostradas da como resultado unas emisiones netas negativas de CO<sub>2</sub>-eq (dióxido de carbono equivalente) en Estados Unidos, lo que no solo demuestra la posibilidad de alcanzar emisiones netas cero mediante una combinación de estas acciones, sino que también resalta una amplia gama de costos para dichas acciones (costos a partir de 2021). Las opciones de mitigación a partir de la conservación y el cambio de estilo de vida no se estiman debido a la dificultad de evaluar los costos de estas medidas. H<sub>2</sub> = hidrógeno. Adaptado con permiso de Farbes *et al.* 2021<sup>360</sup> y Figura SPM.7 en IPCC 2022.<sup>361</sup>

### Acciones de mitigación en las compañías de los EE. UU.

#### Commitments or participation in initiatives



#### Actions undertaken



**La mayoría de las compañías de los EE. UU. han asumido compromisos de mitigación, han realizado inventarios de emisiones o han participado en iniciativas, pero son menos las que toman medidas.**

**Figura 32.23.** En abril de 2023, la mayoría de las compañías de los EE. UU. de muchos sectores se han comprometido a reducir las emisiones o han hecho inventarios de estas, y muchas han participado en iniciativas de mitigación (**arriba**). Los porcentajes son menores en cuanto a las medidas adoptadas (**abajo**). Por ejemplo, muchas compañías están involucradas en mejoras de la eficiencia energética, esfuerzos para reducir las emisiones de la cadena de suministro y esfuerzos de compromiso público. Sin embargo, en todos los sectores, el 20 % o menos presentan reducción de emisiones de los procesos o cambios reales en el comportamiento de las compañías. Créditos de la figura: The Pennsylvania State University, NOAA NCEI y CISSS NC.

### Recuadro 32.3. Caso de estudio de Orlando: Mitigación en la ciudad más visitada del país

En las cinco décadas transcurridas desde la apertura de Walt Disney World, Orlando se ha convertido en la ciudad más visitada de Estados Unidos. En consecuencia, esta comunidad se enfrenta al reto único de gestionar los costos, las demandas y las emisiones de más de 75 millones de visitantes anuales, o casi 300 visitantes por cada residente<sup>362,363</sup>. Para hacer frente a estos impactos, los gobiernos locales han adoptado una estrategia climática ambiciosa, socialmente integradora e innovadora.

La prevalencia de complejos turísticos y multifamiliares, por ejemplo, ha llevado a la adopción de requisitos de eficiencia energética para los edificios comerciales y a un compromiso de toda la comunidad con el 100 % de energía renovable para impulsar la descarbonización del parque local de edificios. Mientras tanto, para atender las necesidades de los residentes locales, muchos de los cuales trabajan en empleos con salarios más bajos asociados a la industria turística, se llevó a cabo un análisis de la carga energética para identificar los vecindarios más necesitados de ayuda.

Al ser el mayor mercado de vehículos de alquiler del mundo, la región ha servido de campo de pruebas para mejorar el pilotaje de vehículos eléctricos y autónomos<sup>364,365</sup>, así como la adopción de una política de preparación de vehículos eléctricos<sup>366</sup>. Los esfuerzos de investigación se han centrado en la seguridad pública cuando varios modos de transporte, como los vehículos de un solo pasajero (más propensos a ser utilizados por los visitantes y los residentes más ricos), están activos en la misma vecindad que autobuses, ciclistas y peatones.

Entre las medidas de reducción de residuos que ya se han puesto en marcha está una instalación de digestión anaeróbica que utiliza las aguas grises y los restos de comida de los parques y complejos turísticos de Disney para generar biogás, una fuente de energía renovable que se utiliza para abastecer de energía a estas mismas instalaciones. Junto con esta solución localizada, los programas para evitar residuos y espigar (p. ej., la mejora de la recogida del exceso de productos agrícolas y perecederos de granjas, minoristas y restaurantes)<sup>367</sup> ofrecen opciones a quienes padecen inseguridad alimentaria.

En conjunto, estas estrategias de mitigación sirven para proteger el medio ambiente local, mejorar la calidad de vida de los residentes locales y mostrar una variedad de soluciones a los cerca de 76 millones de huéspedes que visitan la región cada año.

## Cuentas trazables

### Descripción del proceso

Con base en su propia experiencia, en las nominaciones y en la literatura reciente pertinente, el autor principal del capítulo y el autor principal de la coordinación federal debatieron y seleccionaron un conjunto de expertos a los que invitaron como autores, con lo que buscaban una representación diversa de conocimientos temáticos, perspectivas disciplinarias, etapas profesionales, trayectorias profesionales, geografías y demografías. De las 25 invitaciones, 16 fueron aceptadas, formando un equipo de autores con los conocimientos necesarios para cubrir los temas del capítulo y ofrecer un buen equilibrio de otras características. El equipo de autores comenzó a reunirse regularmente como grupo y luego se dividió en grupos de trabajo más pequeños centrados en diferentes áreas temáticas clave, que también se reunieron regularmente (todas las reuniones fueron virtuales, excepto la reunión en persona de todos los autores celebrada en Washington, DC, en abril de 2023). Durante estas reuniones, el equipo colaboró en el desarrollo de las áreas temáticas clave del capítulo, la identificación de la literatura y las fuentes más importantes y la planificación de síntesis y figuras para el capítulo. El equipo también planificó el taller de participación pública para el capítulo y después analizó los aportes y reacciones de ese taller.

### Mensaje clave 32.1

#### Una mitigación con éxito significa llegar a cero emisiones netas

#### Descripción de la base de evidencia

La evaluación y el resumen de las fuentes y tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero en Estados Unidos se basan principalmente en inventarios y estimaciones de la EPA<sup>7,8</sup>, complementados con datos socioeconómicos, de actividad energética y de producción agrícola procedentes de fuentes oficiales como la Administración de Información Energética de los EE. UU. (Energy Information Administration, EIA)<sup>18,368,369,370,371</sup> y el Banco Mundial<sup>372,373</sup>. Las estimaciones de la EPA sobre las emisiones relacionadas con la energía se basan principalmente en el seguimiento de masas y volúmenes de combustibles quemados (y, en algunos casos, en el monitoreo continuo de emisiones en fuentes puntuales) notificados públicamente a la EIA, la EPA o la Oficina de Estadísticas de Transporte. Las estimaciones de la EPA de las emisiones del sector de la tierra (es decir, uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y agricultura) se basan principalmente en datos de actividad (p. ej., superficie de tierra convertida, número y tipos de ganado y masa de fertilizantes aplicados) y factores de emisión asociados que se han desarrollado a partir de numerosos estudios de casos<sup>11,374</sup>. Los objetivos de gases de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) a nivel federal y estatal se recopilaron a partir de fuentes disponibles públicamente y no son inciertos.

#### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Aunque no hay incertidumbre en cuanto a los objetivos actuales de emisiones y está bien establecido que el calentamiento global será proporcional a las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) acumuladas (p. ej., Matthews *et al.* 2009<sup>375</sup>), existe relativamente poca literatura científica y relativamente pocas metas nacionales e internacionales que aborden la gestión a largo plazo del clima después de haber alcanzado las emisiones netas cero y hasta el siglo XXII<sup>376</sup>.

Las estimaciones de emisiones agrícolas y fugitivas distintas del CO<sub>2</sub> tienen una mayor incertidumbre porque son fuentes “de área” espacialmente heterogéneas y más difíciles de medir directamente<sup>97,377</sup>, como demuestran las discrepancias entre las estimaciones “descendentes” de las emisiones mundiales de metano basadas en mediciones de la atmósfera y las estimaciones “ascendentes” basadas en datos de actividad como

el número y los tipos de ganado y la extensión del cultivo de arroz<sup>378,379</sup>. Por este motivo, se trata de áreas de investigación activas, y los analistas ponen en práctica una serie de herramientas y métodos diferentes e innovadores para reducir la incertidumbre y priorizar los esfuerzos de mitigación (p. ej., Liu et al. 2022<sup>380</sup>; Norooz Oliaee et al. 2022<sup>381</sup>; Conrad et al. 2023<sup>382</sup>).

### Descripción de confianza y probabilidad

Con base en las múltiples fuentes de datos de alta calidad del sistema energético, los autores tienen una *confianza muy alta* tanto en la magnitud global de las emisiones de GHG en los EE. UU. relacionadas con la energía procedentes de cada una de las principales fuentes como en sus cambios relativos a lo largo del tiempo. También existe un amplio consenso entre los modelos dinámicos de vegetación, los modelos de contabilidad del cambio de uso de la tierra y las observaciones atmosféricas en cuanto a la magnitud del sumidero terrestre en los EE. UU. en los años recientes<sup>51</sup>, pero el sumidero ha ido disminuyendo<sup>22</sup> y la absorción futura por parte de los bosques en los EE. UU. dependerá de la gestión y de los impactos del cambio climático, ambos inciertos<sup>21,180,383,384</sup>. Sin embargo, dados los niveles actuales de emisiones y las metas declarados, no se cuestiona la tasa de reducción necesaria. Por estas razones, tenemos una *confianza muy alta* en las afirmaciones contenidas en el mensaje clave.

## Mensaje clave 32.2

### Sabemos cómo reducir drásticamente las emisiones

#### Descripción de la base de evidencia

La evaluación de las opciones establecidas para reducir las emisiones de GHG relacionadas con la energía refleja un amplio cuerpo de literatura y la reciente modelación de los sistemas energéticos<sup>60,385</sup>, incluida una base de datos de 40 escenarios en los EE. UU. de emisiones netas cero<sup>41,42</sup>. Aunque existen diferencias sustanciales en los sistemas energéticos costo-efectivos modelados en estos escenarios dependiendo del diseño del modelo y de los supuestos clave, el mensaje clave y el texto enfatizan en las características que son sólidas en la mayoría de los escenarios, si no en todos<sup>47,50,130,386,387,388</sup>.

#### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

La evaluación de las opciones establecidas para reducir las emisiones de GHG relacionadas con la tierra refleja una importante literatura, pero existen pocos escenarios cuantitativos que respalden las posibles reducciones<sup>96,98,121,177,185,191,389,390,391</sup>. En su lugar, las reducciones potenciales suelen extrapolarse a partir de los estudios localizados de que se dispone. Se justifica una mayor investigación para probar las sensibilidades clave en los escenarios de los modelos energéticos y para evaluar cuantitativamente los factores que van más allá del costo, como la aceptación social y política de (o la oposición a) los cambios en el uso de la tierra y los recursos hídricos y la adopción de tecnologías energéticas y la distribución asociada de beneficios e impactos (así como otros factores no relacionados con el costo analizados en KM 32.4).

#### Descripción de confianza y probabilidad

En 40 de los escenarios más recientes y detallados del sistema energético de emisiones netas cero de los EE. UU., elaborados por 14 modelos independientes y al asumir un amplio abanico de costos y restricciones, la proporción de energía final suministrada por la electricidad aumenta de aproximadamente el 20 % actual al 43 %-57 % en 2050 (el rango percentil 25-75; Figura 32.11), y las energías solar y eólica son sistemáticamente fuentes principales de energía, oscilando normalmente entre el 57 %-80 % de la energía primaria en 2050 (el rango percentil 25-75; Figura 32.10). Sin embargo, los combustibles siguen utilizándose en esos escenarios para algunas aplicaciones del transporte y la industria. La solidez de estas cifras, a pesar de las

muchas diferencias metodológicas, nos da una *confianza alta* en las afirmaciones relacionadas con la energía del mensaje clave.

Una extensa literatura también respalda las oportunidades de grandes reducciones en las emisiones relacionadas con la tierra, lo que nos da una *confianza alta* en la afirmación del mensaje clave relacionada con la tierra<sup>96,98,121,177,185,191,389,390,391</sup>.

Costos actuales de tecnologías como la solar, la eólica y los vehículos eléctricos, y proyección de su despliegue a gran escala en modelos de sistemas energéticos con costo optimizados<sup>41,42,45,66,392</sup>, así como muchos estudios que demuestran el ahorro potencial de costos de las mejoras de la eficiencia energética<sup>393,394</sup>, optimización de los insumos agrícolas<sup>395</sup>, cambios en la dieta<sup>96,98,396</sup> y la reparación de infraestructuras con fugas dan a los autores una *confianza alta* en que muchas opciones de mitigación sean ahora costo-efectivas.

### Mensaje clave 32.3

#### Para alcanzar las emisiones netas cero hay que explorar otras opciones de mitigación

##### Descripción de la base de evidencia

La evaluación de las posibles opciones para reducir las emisiones de GHG relacionadas con la energía refleja un amplio cuerpo de literatura y la reciente modelación del sistema energético, incluida una base de datos de 40 escenarios en los EE. UU. de emisiones netas cero<sup>41,42</sup>, pero este mensaje clave resalta que la escala y la combinación de tecnologías energéticas y opciones de mitigación siguen siendo sensibles a los costos y limitaciones supuestos, aunque inciertos. Del mismo modo, las opciones potenciales para reducir las emisiones de GHG relacionadas con la tierra que se presentan en este mensaje clave no están tan bien estudiadas, y existe un debate abierto sobre la eficacia o costo-efectividad de, por ejemplo, las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía<sup>397,398</sup>, tecnología nuclear avanzada<sup>399,400</sup> y las opciones de gestión del carbono<sup>52,168,401,402</sup>, así como la futura productividad agrícola<sup>403,404</sup>.

##### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Asignamos *confianza media* a la lista de objetivos atractivos para seguir investigando, desarrollando y demostrando, porque la literatura existente discrepa en cuanto al potencial de estas tecnologías o solo unos pocos estudios han defendido que tienen un gran potencial. Cuando los análisis discrepan, puede deberse a que sus conclusiones dependen de suposiciones sobre aspectos profundamente inciertos del desarrollo económico, el comportamiento humano o la innovación tecnológica. En general, se necesita más investigación para evaluar cuantitativamente un mayor número de tecnologías energéticas emergentes y opciones de gestión de la tierra, y especialmente trabajos que incorporen los diversos factores no relacionados con los costos que se comentan en el mensaje clave 32.4.

##### Descripción de confianza y probabilidad

Tenemos una *confianza alta* en que aún desconocemos cuál sistema energético de emisiones netas cero será óptimo en términos de costos (o social y políticamente aceptable) y que no conocemos los tipos o escalas ideales de gestión del carbono para apoyar las emisiones netas cero y la sostenibilidad en general<sup>405,406</sup>. Esto se debe a que hay una variación sustancial en el tipo y la escala de las tecnologías de gestión de la energía y el carbono desplegadas en los escenarios modelo, las proyecciones a largo plazo de los costos tecnológicos abarcan grandes rangos y el apoyo social y político a los diferentes esfuerzos de mitigación no está claro. Aunque la efectividad y la escalabilidad de algunos de los enfoques para reducir las emisiones de

gases distintos del CO<sub>2</sub> relacionadas con la tierra siguen siendo inciertas (p. ej., las enmiendas del suelo o los suplementos alimenticios para el ganado), otras opciones están cada vez más claras, como la gestión del estiércol, los cultivos de cobertura y la reducción de las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados. Por lo tanto, tenemos *confianza media* en cuanto a las opciones para reducir estas emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la tierra.

### Mensaje clave 32.4

#### La mitigación puede ser sostenible, sana y justa

##### Descripción de la base de evidencia

La evaluación del impacto histórico y futuro de los sistemas energéticos sobre, por ejemplo, el agua<sup>279,280,283,284</sup>, la contaminación del aire<sup>102,234,245,246,253,254</sup>, la seguridad energética<sup>31,339</sup>, el trabajo<sup>233,247,293,298,305</sup> y la equidad energética y la justicia medioambiental<sup>217,251,259,300,309,329</sup> se basa en una literatura académica diversa y en rápido crecimiento, como se cita en el capítulo.

##### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Como se mencionó con respecto a otros mensajes clave, faltan análisis cualitativos y cuantitativos específicos y herramientas de toma de decisiones con respecto a cómo la mitigación puede afectar y verse afectada por la equidad energética, la justicia ambiental, el uso de la tierra, el trabajo, el agua, la contaminación del aire y la seguridad energética en diferentes lugares, momentos y contextos sociales, demográficos y políticos (Carley, Evans *et al.* 2018). También faltan análisis y herramientas que reflejen las incertidumbres y opciones tecnológicas, sociales, políticas y medioambientales interactivas para informar la toma de decisiones de las múltiples partes interesadas<sup>407</sup>.

##### Descripción de confianza y probabilidad

Una extensa literatura demuestra los posibles beneficios para la salud de la mitigación del cambio climático, especialmente en lo que respecta a la disminución de la contaminación del aire. Menos estudios, pero aún numerosos, han demostrado que el ahorro de costos y recursos o los beneficios sociales netos de muchas opciones de mitigación pueden recaer en poblaciones específicas. Por lo tanto, tenemos una *confianza alta* en los beneficios potenciales para la salud y el bienestar humanos, incluidos los efectos medioambientales y socioeconómicos específicos. Sin embargo, la investigación disponible también nos da una *confianza alta* en que los beneficios de la mitigación pueden distribuirse de forma desigual en ausencia de esfuerzos proactivos para garantizar la equidad.



## Mensaje clave 32.5

### Gobiernos, organizaciones y particulares pueden actuar para reducir las emisiones

#### Descripción de la base de evidencia

Nuestra evaluación de los posibles actores y acciones de mitigación se basa tanto en las acciones representadas en los modelos como en los estudios de los investigadores<sup>408,409,410,411,412</sup>, como de informes y bases de datos que han recopilado listas de acciones emprendidas en el pasado (p. ej., el Center for Climate and Energy Solutions State Climate Policy Maps<sup>348</sup>, Base de Datos de Incentivos Estatales para las Energías Renovables y Eficiencia de la Universidad Estatal de Carolina del Norte<sup>413</sup>, CDP States and Regions Climate Tracker<sup>414</sup> y el conjunto de datos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Zona de Actores no Estatales para la Acción Climática<sup>415</sup>).

#### Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Ninguna jurisdicción ha pasado aún de una economía basada en los combustibles fósiles a otra profundamente descarbonizada o con cero emisiones netas. Además, las acciones para iniciar ese camino pueden ser diferentes de las que llegan al final<sup>416,417</sup>. La investigación futura puede explorar de forma productiva los límites de las acciones de determinados grupos o jurisdicciones y tratar de evaluar dónde son necesarias y más valiosas las colaboraciones para apoyar la mitigación<sup>417,418</sup>.

#### Descripción de confianza y probabilidad

Los compromisos públicos asumidos y las medidas ya adoptadas (según el seguimiento de las fuentes citadas en la base de evidencia anterior) nos dan una *confianza alta* en que la mitigación puede ser apoyada por una amplia gama de actores de muy diversas maneras. Los avances históricos en la reducción de las emisiones (p. ej., las emisiones de electricidad de los EE. UU. desde 2007) y los análisis de modelos prospectivos nos dan igualmente una *confianza alta* en que un importante potencial a corto plazo en los EE. UU. recae en acciones para impulsar las tecnologías con bajas emisiones de carbono<sup>50,255,387,419,420,421</sup>, uso moderado de vehículos de combustión interna<sup>65,66,68</sup>, mejoras de la eficiencia de los edificios<sup>32,33</sup> y cambios en la dieta<sup>96,98,396</sup>.

## Referencias

1. Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld, 2021: Technical summary. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 33–144. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
2. IPCC, 2022: *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>
3. Feijoo, F., G. Iyer, M. Binsted, and J. Edmonds, 2020: US energy system transitions under cumulative emissions budgets. *Climatic Change*, **162** (4), 1947–1963. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02670-0>
4. Schaeffer, R., A. Köberle, H.L. van Soest, C. Bertram, G. Luderer, K. Riahi, V. Krey, D.P. van Vuuren, E. Kriegler, S. Fujimori, W. Chen, C. He, Z. Vrontisi, S. Vishwanathan, A. Garg, R. Mathur, S. Shekhar, K. Oshiro, F. Ueckerdt, G. Safonov, G. Iyer, K. Gi, and V. Potashnikov, 2020: Comparing transformation pathways across major economies. *Climatic Change*, **162** (4), 1787–1803. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02837-9>
5. van Soest, H.L., M.G.J. den Elzen, and D.P. van Vuuren, 2021: Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nature Communications*, **12** (1), 2140. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22294-x>
6. DOS and EOP, 2021: *The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050*. U.S. Department of State and U.S. Executive Office of the President, Washington, DC. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/us-long-term-strategy.pdf>
7. EPA, 2022: *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020*. EPA 430-R-22-003. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020>
8. EPA, 2023: *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2021*. EPA 430-R-23-002. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/draft-inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2021>
9. Davis, S.J., Z. Liu, Z. Deng, B. Zhu, P. Ke, T. Sun, R. Guo, C. Hong, B. Zheng, Y. Wang, O. Boucher, P. Gentine, and P. Ciais, 2022: Emissions rebound from the COVID-19 pandemic. *Nature Climate Change*, **12** (5), 412–414. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01332-6>
10. Liu, Z., P. Ciais, Z. Deng, S.J. Davis, B. Zheng, Y. Wang, D. Cui, B. Zhu, X. Dou, P. Ke, T. Sun, R. Guo, H. Zhong, O. Boucher, F.-M. Bréon, C. Lu, R. Guo, J. Xue, E. Boucher, K. Tanaka, and F. Chevallier, 2020: Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel and cement production. *Scientific Data*, **7** (1), 392. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00708-7>
11. IPCC, 2006: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston, S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, Eds. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
12. Crippa, M., D. Guizzardi, E. Pisoni, E. Solazzo, A. Guion, M. Muntean, A. Florczyk, M. Schiavina, M. Melchiorri, and A.F. Hutfilter, 2021: Global anthropogenic emissions in urban areas: patterns, trends, and challenges. *Environmental Research Letters*, **16** (7), 074033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac00e2>

13. Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, M.W. Jones, R.M. Andrew, L. Gregor, et al., 2022: Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, **14** (11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
14. IEA, 2023: Greenhouse Gas Emissions from Energy. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy>
15. Liu, Z., P. Ciais, Z. Deng, R. Lei, S.J. Davis, S. Feng, B. Zheng, D. Cui, X. Dou, B. Zhu, R. Guo, P. Ke, T. Sun, C. Lu, P. He, Y. Wang, X. Yue, Y. Wang, Y. Lei, H. Zhou, Z. Cai, Y. Wu, R. Guo, T. Han, J. Xue, O. Boucher, E. Boucher, F. Chevallier, K. Tanaka, Y. Wei, H. Zhong, C. Kang, N. Zhang, B. Chen, F. Xi, M. Liu, F.-M. Bréon, Y. Lu, Q. Zhang, D. Guan, P. Gong, D.M. Kammen, K. He, and H.J. Schellnhuber, 2020: Near-real-time monitoring of global CO<sub>2</sub> emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, **11** (1), 5172. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
16. Feng, K., S.J. Davis, L. Sun, and K. Hubacek, 2015: Drivers of the US CO<sub>2</sub> emissions 1997–2013. *Nature Communications*, **6** (1), 7714. <https://doi.org/10.1038/ncomms8714>
17. Scott Institute for Energy Innovation, 2017: Power Sector Carbon Index. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA. <https://www.emissionsindex.org>
18. EIA, 2015: Residential Energy Consumption Survey. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/consumption/residential/data/2015/>
19. Goldstein, B., D. Gounaridis, and J.P. Newell, 2020: The carbon footprint of household energy use in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (32), 19122–19130. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922205117>
20. Anderegg, W.R.L., O.S. Chegwidden, G. Badgley, Anna T. Trugman, D. Cullenward, J.T. Abatzoglou, Jeffrey A. Hicke, J. Freeman, and J.J. Hamman, 2022: Future climate risks from stress, insects and fire across US forests. *Ecology Letters*, **25** (6), 1510–1520. <https://doi.org/10.1111/ele.14018>
21. Domke, G.M., S.N. Oswalt, B.F. Walters, and R.S. Morin, 2020: Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **117** (40), 24649–24651. <https://doi.org/10.1073/pnas.2010840117>
22. 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>
23. Lopez, A., B. Roberts, D. Heimiller, N. Blair, and G. Porro, 2012: U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis. NREL/TP-6A20-51946. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51946.pdf>
24. Shaner, M.R., S.J. Davis, N.S. Lewis, and K. Caldeira, 2018: Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power in the United States. *Energy and Environmental Science*, **11** (4), 914–925. <https://doi.org/10.1039/c7ee03029k>
25. Olson-Hazboun, S.K., P.D. Howe, and A. Leiserowitz, 2018: The influence of extractive activities on public support for renewable energy policy. *Energy Policy*, **123**, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.044>
26. Grubert, E., 2020: Fossil electricity retirement deadlines for a just transition. *Science*, **370** (6521), 1171–1173. <https://doi.org/10.1126/science.abe0375>
27. Shearer, C., D. Tong, R. Fofrich, and S.J. Davis, 2020: Committed emissions of the U.S. power sector, 2000–2018. *AGU Advances*, **1** (3), e2020AV000162. <https://doi.org/10.1029/2020av000162>
28. Tong, D., D.J. Farnham, L. Duan, Q. Zhang, N.S. Lewis, K. Caldeira, and S.J. Davis, 2021: Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide. *Nature Communications*, **12** (1), 6146. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26355-z>
29. Stokes, L.C. and H.L. Breetz, 2018: Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy. *Energy Policy*, **113**, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.057>
30. Noblet, C.L., M.F. Teisl, K. Evans, M.W. Anderson, S. McCoy, and E. Cervone, 2015: Public preferences for investments in renewable energy production and energy efficiency. *Energy Policy*, **87**, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.09.003>

31. Manley, D.K., V.A. Hines, M.W. Jordan, and R.E. Stoltz, 2013: A survey of energy policy priorities in the United States: Energy supply security, economics, and the environment. *Energy Policy*, **60**, 687–696. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.061>
32. Belussi, L., B. Barozzi, A. Bellazzi, L. Danza, A. Devitofrancesco, C. Fanciulli, M. Ghellere, G. Guazzi, I. Meroni, F. Salamone, F. Scamoni, and C. Scrosati, 2019: A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, **25**, 100772. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100772>
33. Chen, S., G. Zhang, X. Xia, S. Setunge, and L. Shi, 2020: A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings. *Energy and Buildings*, **216**, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109944>
34. Holz-Rau, C. and J. Scheiner, 2019: Land-use and transport planning – A field of complex cause-impact relationships. Thoughts on transport growth, greenhouse gas emissions and the built environment. *Transport Policy*, **74**, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.12.004>
35. Tayarani, M., A. Poorfakhraei, R. Nadafianshahamabadi, and G. Rowangould, 2018: Can regional transportation and land-use planning achieve deep reductions in GHG emissions from vehicles? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **63**, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.05.010>
36. Neves, A. and C. Brand, 2019: Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **123**, 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.022>
37. Oeschger, G., P. Carroll, and B. Caulfield, 2020: Micromobility and public transport integration: The current state of knowledge. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **89**, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102628>
38. Hannan, M.A., M.M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P.J. Ker, 2018: State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, **6**, 19362–19378. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2817655>
39. Leach, F., G. Kalghatgi, R. Stone, and P. Miles, 2020: The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, **1**, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
40. Li, Z., A. Khajepour, and J. Song, 2019: A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*, **182**, 824–839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.077>
41. Browning, M., J. McFarland, J. Bistline, G. Boyd, M. Muratori, M. Binsted, C. Harris, T. Mai, G. Blanford, J. Edmonds, A.A. Fawcett, O. Kaplan, and J. Weyant, 2023: Net-zero CO<sub>2</sub> by 2050 scenarios for the United States in the Energy Modeling Forum 37 study. *Energy and Climate Change*, **4**, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100104>
42. Huppmann, D., J. Bistline, J. DeAngelo, R. Jones, J. McFarland, J. Weyant, and S.J. Davis, 2023: NCA5 Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. Mitigation Chapter of the Fifth National Climate Assessment and the International Institute for Applied Systems Analysis. Vienna, Austria.
43. Azevedo, I.M.L., 2014: Consumer end-use energy efficiency and rebound effects. *Annual Review of Environment and Resources*, **39** (1), 393–418. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021913-153558>
44. Saunders, H.D., J. Roy, I.M.L. Azevedo, D. Chakravarty, S. Dasgupta, S. de la Rue du Can, A. Druckman, R. Fouquet, M. Grubb, B. Lin, R. Lowe, R. Madlener, D.M. McCoy, L. Mundaca, T. Oreszczyn, S. Sorrell, D. Stern, K. Tanaka, and T. Wei, 2021: Energy efficiency: What has research delivered in the last 40 years? *Annual Review of Environment and Resources*, **46** (1), 135–165. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-084937>
45. Azevedo, I., C. Bataille, J. Bistline, L. Clarke, and S. Davis, 2021: Net-zero emissions energy systems: What we know and do not know. *Energy and Climate Change*, **2**, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100049>
46. Clack, C.T.M., A. Choukulkar, B. Coté, and S.A. McKee, 2021: A Plan for Economy-Wide Decarbonization of the United States. Vibrant Clean Energy, Boulder, CO, 18 pp. [https://www.vibrantcleanenergy.com/wp-content/uploads/2021/10/US-Econ-Decarb\\_CCSA.pdf](https://www.vibrantcleanenergy.com/wp-content/uploads/2021/10/US-Econ-Decarb_CCSA.pdf)
47. DeAngelo, J., I. Azevedo, J. Bistline, L. Clarke, G. Luderer, E. Byers, and S.J. Davis, 2021: Energy systems in scenarios at net-zero CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Communications*, **12** (1), 6096. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26356-y>

48. Jenkins, J.D., Z. Zhou, R. Ponciroli, R.B. Vilim, F. Ganda, F. de Sisternes, and A. Botterud, 2018: The benefits of nuclear flexibility in power system operations with renewable energy. *Applied Energy*, **222**, 872–884. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.002>
49. Larson, E., C. Greig, J. Jenkins, E. Mayfield, A. Pascale, C. Zhang, J. Drossman, R. Williams, S. Pacala, R. Socolow, E. Baik, R. Birdsey, R. Duke, R. Jones, B. Haley, E. Leslie, K. Paustian, and A. Swan, 2021: Final Report Summary—Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts. Princeton University, Princeton, NJ. <https://netzeroamerica.princeton.edu/the-report>
50. Murray, B.C., J. Bistline, J. Creason, E. Wright, A. Kanudia, and F. de la Chesnaye, 2018: The EMF 32 study on technology and climate policy strategies for greenhouse gas reductions in the U.S. electric power sector: An overview. *Energy Economics*, **73**, 286–289. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.007>
51. Pacala, S.W., G.C. Hurtt, D. Baker, P. Peylin, R.A. Houghton, R.A. Birdsey, L. Heath, E.T. Sundquist, R.F. Stallard, P. Ciais, P. Moorcroft, J.P. Caspersen, E. Shevliakova, B. Moore, G. Kohlmaier, E. Holland, M. Gloor, M.E. Harmon, S.M. Fan, J.L. Sarmiento, C.L. Goodale, D. Schimel, and C.B. Field, 2001: Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, **292** (5525), 2316–2320. <https://doi.org/10.1126/science.1057320>
52. Williams, J.H., R.A. Jones, B. Haley, G. Kwok, J. Hargreaves, J. Farbes, and M.S. Torn, 2021: Carbon-neutral pathways for the United States. *AGU Advances*, **2** (1), e2020AV000284. <https://doi.org/10.1029/2020av000284>
53. Bistline, J.E.T. and G.J. Blanford, 2021: The role of the power sector in net-zero energy systems. *Energy and Climate Change*, **2**, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100045>
54. Inflation Reduction Act of 2022. 117th Congress, Pub. L. No. 117-169, 136 Stat. 1818, August 16, 2022. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text>
55. Cole, W.J., D. Greer, P. Denholm, A.W. Frazier, S. Machen, T. Mai, N. Vincent, and S.F. Baldwin, 2021: Quantifying the challenge of reaching a 100% renewable energy power system for the United States. *Joule*, **5** (7), 1732–1748. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.011>
56. Bistline, J.E.T. and G.J. Blanford, 2021: Impact of carbon dioxide removal technologies on deep decarbonization of the electric power sector. *Nature Communications*, **12** (1), 3732. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23554-6>
57. EPRI, 2022: Nuclear Energy in Long-Term System Models: A Multi-Model Perspective. Electric Power Research Institute, 136 pp. <https://www.epri.com/research/products/000000003002023697>
58. Bloom, A., L. Azar, J. Caspary, D. Lew, N. Miller, A. Silverstein, J. Simonelli, and R. Zavadil, 2021: Transmission Planning for 100% Clean Electricity. Energy Systems Integration Group, 29 pp. <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2021/02/Transmission-Planning-White-Paper.pdf>
59. Jacobson, M.Z., M.A. Delucchi, M.A. Cameron, and B.A. Frew, 2015: Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112** (49), 15060–15065. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510028112>
60. Bistline, J.E.T., 2021: Roadmaps to net-zero emissions systems: Emerging insights and modeling challenges. *Joule*, **5** (10), 2551–2563. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.012>
61. Mai, T.T., P. Jadun, J.S. Logan, C.A. McMillan, M. Muratori, D.C. Steinberg, L.J. Vimmerstedt, B. Haley, R. Jones, and B. Nelson, 2018: Electrification Futures Study: Scenarios of Electric Technology Adoption and Power Consumption for the United States. NREL/TP-6A20-71500. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://doi.org/10.2172/1459351>
62. Ueckerdt, F., C. Bauer, A. Dirnhaichner, J. Everall, R. Sacchi, and G. Luderer, 2021: Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. *Nature Climate Change*, **11** (5), 384–393. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
63. Hardman, S., 2019: Understanding the impact of reoccurring and non-financial incentives on plug-in electric vehicle adoption – A review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **119**, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.002>
64. Jenn, A., I.L. Azevedo, and P. Ferreira, 2013: The impact of federal incentives on the adoption of hybrid electric vehicles in the United States. *Energy Economics*, **40**, 936–942. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.07.025>
65. Jenn, A., K. Springel, and A.R. Gopal, 2018: Effectiveness of electric vehicle incentives in the United States. *Energy Policy*, **119**, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.065>

66. Muratori, M., M. Alexander, D. Arent, M. Bazilian, P. Cazzola, E.M. Dede, J. Farrell, C. Gearhart, D. Greene, A. Jenn, M. Keyser, T. Lipman, S. Narumanchi, A. Pesaran, R. Sioshansi, E. Suomalainen, G. Tal, K. Walkowicz, and J. Ward, 2021: The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, **3** (2), 022002. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abe0ad>
67. Rietmann, N., B. Hügler, and T. Lieven, 2020: Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Cleaner Production*, **261**, 121038. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038>
68. Tong, F., A. Jenn, D. Wolfson, C.D. Scown, and M. Auffhammer, 2021: Health and climate impacts from long-haul truck electrification. *Environmental Science & Technology*, **55** (13), 8514–8523. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01273>
69. Borlaug, B., M. Muratori, M. Gilleran, D. Woody, W. Muston, T. Canada, A. Ingram, H. Gresham, and C. McQueen, 2021: Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems. *Nature Energy*, **6** (6), 673–682. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00855-0>
70. Forrest, K., M. Mac Kinnon, B. Tarroja, and S. Samuelsen, 2020: Estimating the technical feasibility of fuel cell and battery electric vehicles for the medium and heavy duty sectors in California. *Applied Energy*, **276**, 115439. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115439>
71. Phadke, A.A., A. Khandekar, N. Abhyankar, D. Wooley, and D. Rajagopal, 2021: Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. U.S. Department of Energy, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. <https://eta-publications.lbl.gov/publications/why-regional-and-long-haul-trucks-are>
72. Smith, D., R. Graves, B. Ozpineci, P.T. Jones, J. Lustbader, K. Kelly, K. Walkowicz, A. Birky, G. Payne, C. Sigler, and J. Mosbacher, 2020: Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification: An Assessment of Technology and Knowledge Gaps. ORNL/SPR-2020/7. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory and National Renewable Energy Laboratory. <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub136575.pdf>
73. Tong, F., D. Wolfson, A. Jenn, C.D. Scown, and M. Auffhammer, 2021: Energy consumption and charging load profiles from long-haul truck electrification in the United States. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, **1** (2), 025007. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac186a>
74. Bergero, C., G. Gosnell, D. Gielen, S. Kang, M. Bazilian, and S.J. Davis, 2023: Pathways to net-zero emissions from aviation. *Nature Sustainability*, **6** (4), 404–414. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01046-9>
75. Davis, S.J., N.S. Lewis, M. Shaner, S. Aggarwal, D. Arent, I.L. Azevedo, S.M. Benson, T. Bradley, J. Brouwer, Y.-M. Chiang, C.T.M. Clack, A. Cohen, S. Doig, J. Edmonds, P. Fennell, C.B. Field, B. Hannegan, B.-M. Hodge, M.I. Hoffert, E. Ingersoll, P. Jaramillo, K.S. Lackner, K.J. Mach, M. Mastrandrea, J. Ogden, P.F. Peterson, D.L. Sanchez, D. Sperling, J. Stagner, J.E. Trancik, C.-J. Yang, and K. Caldeira, 2018: Net-zero emissions energy systems. *Science*, **360** (6396), 9793. <https://doi.org/10.1126/science.aas9793>
76. Deason, J. and M. Borgeson, 2019: Electrification of buildings: Potential, challenges, and outlook. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, **6** (4), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s40518-019-00143-2>
77. Mahone, A., C. Li, Z. Subin, M. Sontag, G. Mantegna, A. Karolides, A.K.A. German, and P. Morris, 2019: Residential Building Electrification in California: Consumer Economics, Greenhouse Gases and Grid Impacts. Energy and Environmental Economics, San Francisco, CA. [https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2019/04/E3\\_Residential\\_Building\\_Electrification\\_in\\_California\\_April\\_2019.pdf](https://www.ethree.com/wp-content/uploads/2019/04/E3_Residential_Building_Electrification_in_California_April_2019.pdf)
78. Tarroja, B., F. Chiang, A. AghaKouchak, S. Samuelsen, S.V. Raghavan, M. Wei, K. Sun, and T. Hong, 2018: Translating climate change and heating system electrification impacts on building energy use to future greenhouse gas emissions and electric grid capacity requirements in California. *Applied Energy*, **225**, 522–534. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.003>
79. Madeddu, S., F. Ueckerdt, M. Pehl, J. Peterseim, M. Lord, K.A. Kumar, C. Krüger, and G. Luderer, 2020: The CO<sub>2</sub> reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters*, **15** (12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
80. Bataille, C., M. Åhman, K. Neuhoff, L.J. Nilsson, M. Fishedick, S. Lechtenböhmer, B. Solano-Rodriguez, A. Denis-Ryan, S. Stiebert, H. Waisman, O. Sartor, and S. Rahbar, 2018: A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, **187**, 960–973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>

81. Bataille, C.G.F., 2020: Physical and policy pathways to net-zero emissions industry. *WIREs Climate Change*, **11** (2), e633. <https://doi.org/10.1002/wcc.633>
82. Denis-Ryan, A., C. Bataille, and F. Jotzo, 2016: Managing carbon-intensive materials in a decarbonizing world without a global price on carbon. *Climate Policy*, **16** (sup1), S110–S128. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1176008>
83. Rissman, J., C. Bataille, E. Masanet, N. Aden, W.R. Morrow, N. Zhou, N. Elliott, R. Dell, N. Heeren, B. Huckestein, J. Cresko, S.A. Miller, J. Roy, P. Fennell, B. Cremmins, T. Koch Blank, D. Hone, E.D. Williams, S. de la Rue du Can, B. Sisson, M. Williams, J. Katzenberger, D. Burtraw, G. Sethi, H. Ping, D. Danielson, H. Lu, T. Lorber, J. Dinkel, and J. Helseth, 2020: Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, **266**, 114848. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>
84. Thiel, G.P. and A.K. Stark, 2021: To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule*, **5** (3), 531–550. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.12.007>
85. Fennell, P., J. Driver, C. Bataille, and S.J. Davis, 2022: Cement and steel—Nine steps to net zero. *Nature*, **603**, 574–577. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00758-4>
86. Winkler, K., R. Fuchs, M. Rounsevell, and M. Herold, 2021: Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature Communications*, **12** (1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
87. Searchinger, T.D., S. Wiersenius, T. Beringer, and P. Dumas, 2018: Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, **564** (7735), 249–253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z>
88. Hong, C., H. Zhao, Y. Qin, J.A. Burney, J. Pongratz, K. Hartung, Y. Liu, F.C. Moore, R.B. Jackson, Q. Zhang, and S.J. Davis, 2022: Land-use emissions embodied in international trade. *Science*, **376** (6593), 597–603. <https://doi.org/10.1126/science.abj1572>
89. Mathews, J.A. and H. Tan, 2009: Biofuels and indirect land use change effects: The debate continues. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **3** (3), 305–317. <https://doi.org/10.1002/bbb.147>
90. Mosier, S., S.C. Córdova, and G.P. Robertson, 2021: Restoring soil fertility on degraded lands to meet food, fuel, and climate security needs via perennialization. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, **5**, 706142. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.706142>
91. EPA, 2021: From Farm to Kitchen: The Environmental Impacts of U.S. Food Waste. EPA 600-R21 171. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. <https://www.epa.gov/land-research/farm-kitchen-environmental-impacts-us-food-waste>
92. Gustavsson, J., C. Cederberg, U. Sonesson, R. van Otterdijk, and A. Meybeck, 2011: Global Food Losses and Food Waste—Extent, Causes and Prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/i2697e/i2697e.pdf>
93. Godfray, H.C.J., P. Aveyard, T. Garnett, J.W. Hall, T.J. Key, J. Lorimer, R.T. Pierrehumbert, P. Scarborough, M. Springmann, and S.A. Jebb, 2018: Meat consumption, health, and the environment. *Science*, **361** (6399), 5324. <https://doi.org/10.1126/science.aam5324>
94. Poore, J. and T. Nemecek, 2018: Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, **360** (6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
95. Tilman, D. and M. Clark, 2014: Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, **515** (7528), 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
96. Willett, W., J. Rockström, B. Loken, M. Springmann, T. Lang, S. Vermeulen, T. Garnett, D. Tilman, F. DeClerck, A. Wood, M. Jonell, M. Clark, L.J. Gordon, J. Fanzo, C. Hawkes, R. Zurayk, J.A. Rivera, W. De Vries, L. Majele Sibanda, A. Afshin, A. Chaudhary, M. Herrero, R. Agustina, F. Branca, A. Lartey, S. Fan, B. Crona, E. Fox, V. Bignet, M. Troell, T. Lindahl, S. Singh, S.E. Cornell, K. Srinath Reddy, S. Narain, S. Nishtar, and C.J.L. Murray, 2019: Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, **393** (10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31788-4)
97. Hong, C., J.A. Burney, J. Pongratz, J.E.M.S. Nabel, N.D. Mueller, R.B. Jackson, and S.J. Davis, 2021: Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017. *Nature*, **589** (7843), 554–561. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03138-y>

98. Clark, M.A., N.G.G. Domingo, K. Colgan, S.K. Thakrar, D. Tilman, J. Lynch, I.L. Azevedo, and J.D. Hill, 2020: Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, **370** (6517), 705–708. <https://doi.org/10.1126/science.aba7357>
99. Schmidinger, K. and E. Stehfest, 2012: Including CO<sub>2</sub> implications of land occupation in LCAs—Method and example for livestock products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **17** (8), 962–972. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0434-7>
100. Springmann, M., L. Spajic, M.A. Clark, J. Poore, A. Herforth, P. Webb, M. Rayner, and P. Scarborough, 2020: The healthiness and sustainability of national and global food based dietary guidelines: Modelling study. *BMJ*, **370**, m2322. <https://doi.org/10.1136/bmj.m2322>
101. Falcon, W.P., R.L. Naylor, and N.D. Shankar, 2022: Rethinking global food demand for 2050. *Population and Development Review*, **48** (4), 921–957. <https://doi.org/10.1111/padr.12508>
102. Domingo, N.G.G., S. Balasubramanian, S.K. Thakrar, M.A. Clark, P.J. Adams, J.D. Marshall, N.Z. Muller, S.N. Pandis, S. Polasky, A.L. Robinson, C.W. Tessum, D. Tilman, P. Tschofen, and J.D. Hill, 2021: Air quality-related health damages of food. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (20), e2013637118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013637118>
103. Coleman-Jensen, A., M.P. Rabbitt, C.A. Gregory, and A. Singh, 2022: Household Food Security in the United States in 2021. ERR-309. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=104655>
104. Khaleel, A.A., T.J. Sauer, and J.C. Tyndall, 2020: Changes in deep soil organic carbon and soil properties beneath tree windbreak plantings in the U.S. Great Plains. *Agroforestry Systems*, **94** (2), 565–581. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00425-0>
105. Osorio, R.J., C.J. Barden, and I.A. Ciampitti, 2019: GIS approach to estimate windbreak crop yield effects in Kansas–Nebraska. *Agroforestry Systems*, **93** (4), 1567–1576. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0270-2>
106. Schoeneberger, M., G. Bentrup, H. de Gooijer, R. Soolanayakanahally, T. Sauer, J. Brandle, X. Zhou, and D. Current, 2012: Branching out: Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, **67** (5), 128A–136A. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.128a>
107. Meurer, K.H.E., N.R. Haddaway, M.A. Bolinder, and T. Kätterer, 2018: Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews*, **177**, 613–622. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015>
108. Tamburini, G., R. Bommarco, T.C. Wanger, C. Kremen, M.G.A. Van der Heijden, M. Liebman, and S. Hallin, 2020: Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, **6** (45), 1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
109. Sela, S., H.M. van Es, B.N. Moebius-Clune, R. Marjerison, J. Melkonian, D. Moebius-Clune, R. Schindelbeck, and S. Gomes, 2016: Adapt-N outperforms grower-selected nitrogen rates in northeast and midwestern United States strip trials. *Agronomy Journal*, **108** (4), 1726–1734. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0606>
110. Venterea, R.T., J.A. Coulter, and M.S. Dolan, 2016: Evaluation of intensive “4R” strategies for decreasing nitrous oxide emissions and nitrogen surplus in rainfed corn. *Journal of Environmental Quality*, **45** (4), 1186–1195. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.01.0024>
111. Ruser, R. and R. Schulz, 2015: The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) release from agricultural soils—A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **178** (2), 171–188. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400251>
112. Eagle, A.J., L.P. Olander, K.L. Lockier, J.B. Heffernan, and E.S. Bernhardt, 2017: Fertilizer management and environmental factors drive N<sub>2</sub>O and NO<sub>3</sub> losses in corn: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, **81** (5), 1191–1202. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0281>
113. Muller, J., D. De Rosa, J. Friedl, M. De Antoni Migliorati, D. Rowlings, P. Grace, and C. Scheer, 2023: Combining nitrification inhibitors with a reduced N rate maintains yield and reduces N<sub>2</sub>O emissions in sweet corn. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **125** (2), 107–121. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10185-y>
114. Ocko, I.B., T. Sun, D. Shindell, M. Oppenheimer, A.N. Hristov, S.W. Pacala, D.L. Mauzerall, Y. Xu, and S.P. Hamburg, 2021: Acting rapidly to deploy readily available methane mitigation measures by sector can immediately slow global warming. *Environmental Research Letters*, **16** (5), 054042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf9c8>



115. IPCC, 2021: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
116. Ocko, I.B., V. Naik, and D. Paynter, 2018: Rapid and reliable assessment of methane impacts on climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18** (21), 15555–15568. <https://doi.org/10.5194/acp-18-15555-2018>
117. Aydin, G., I. Karakurt, and K. Aydiner, 2012: Analysis and mitigation opportunities of methane emissions from the energy sector. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **34** (11), 967–982. <https://doi.org/10.1080/15567031003716725>
118. Kang, M., S. Christian, M.A. Celia, D.L. Mauzerall, M. Bill, A.R. Miller, Y. Chen, M.E. Conrad, T.H. Darrah, and R.B. Jackson, 2016: Identification and characterization of high methane-emitting abandoned oil and gas wells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113** (48), 13636–13641. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605913113>
119. Lauvaux, T., C. Giron, M. Mazzolini, A. d'Aspremont, R. Duren, D. Cusworth, D. Shindell, and P. Ciais, 2022: Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science*, **375** (6580), 557–561. <https://doi.org/10.1126/science.abj4351>
120. Omara, M., N. Zimmerman, M.R. Sullivan, X. Li, A. Ellis, R. Cesa, R. Subramanian, A.A. Presto, and A.L. Robinson, 2018: Methane emissions from natural gas production sites in the United States: Data synthesis and national estimate. *Environmental Science & Technology*, **52** (21), 12915–12925. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03535>
121. Fargione, J.E., S. Bassett, T. Boucher, S.D. Bridgham, R.T. Conant, S.C. Cook-patton, P.W. Ellis, A. Falcucci, J.W. Fourqurean, T. Gopalakrishna, H. Gu, B. Henderson, M.D. Hurteau, K.D. Kroeger, T. Kroeger, T.J. Lark, S.M. Leavitt, G. Lomax, R.I. McDonald, J.P. Megonigal, D.A. Miteva, C.J. Richardson, J. Sanderman, D. Shoch, S.A. Spawn, J.W. Veldman, C.A. Williams, P.B. Woodbury, C. Zganjar, M. Baranski, R.A. Houghton, E. Landis, E. McGlynn, W.H. Schlesinger, J.V. Siikamakiariana, E. Sutton-Grierand, and B.W. Griscom, 2018: Natural climate solutions for the United States. *Science Advances*, **4** (11), 1869. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1869>
122. APA, 2012: APA Policy Guide on Smart Growth. American Planning Association. <https://www.planning.org/policy/guides/adopted/smartgrowth.htm>
123. Broitman, D. and E. Koomen, 2015: Residential density change: Densification and urban expansion. *Computers, Environment and Urban Systems*, **54**, 32–46. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.006>
124. Butler, B.J., P.F. Catanzaro, J.L. Greene, J.H. Hewes, M.A. Kilgore, D.B. Kittredge, Z. Ma, and M.L. Tyrrell, 2012: Taxing family forest owners: Implications of federal and state policies in the United States. *Journal of Forestry*, **110** (7), 371–380. <https://doi.org/10.5849/jof.11-097>
125. Cathcart, J.F., J.D. Kline, M. Delaney, and M. Tilton, 2007: Carbon storage and Oregon's land-use planning program. *Journal of Forestry*, **105** (4), 167–172. <https://doi.org/10.1093/jof/105.4.167>
126. Harris, N.L., D.A. Gibbs, A. Baccini, R.A. Birdsey, S. de Bruin, M. Farina, L. Fatoyinbo, M.C. Hansen, M. Herold, R.A. Houghton, P.V. Potapov, D.R. Suarez, R.M. Roman-Cuesta, S.S. Saatchi, C.M. Slay, S.A. Turubanova, and A. Tyukavina, 2021: Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, **11** (3), 234–240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
127. Lister, A.J., H. Andersen, T. Frescino, D. Gatzliolis, S. Healey, L.S. Heath, G.C. Liknes, R. McRoberts, G.G. Moisen, M. Nelson, R. Riemann, K. Schleeweis, T.A. Schroeder, J. Westfall, and B.T. Wilson, 2020: Use of remote sensing data to improve the efficiency of national forest inventories: A case study from the United States National Forest Inventory. *Forests*, **11** (12). <https://doi.org/10.3390/f11121364>
128. Zheng, B., P. Ciais, F. Chevallier, H. Yang, J.G. Canadell, Y. Chen, I.R. van der Velde, I. Aben, E. Chuvieco, S.J. Davis, M. Deeter, C. Hong, Y. Kong, H. Li, H. Li, X. Lin, K. He, and Q. Zhang, 2023: Record-high CO<sub>2</sub> emissions from boreal fires in 2021. *Science*, **379** (6635), 912–917. <https://doi.org/10.1126/science.ade0805>
129. Smith, O., O. Cattell, E. Farcot, R.D. O'Dea, and K.I. Hopcraft, 2022: The effect of renewable energy incorporation on power grid stability and resilience. *Science Advances*, **8** (9), 6734. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj6734>

130. Clarke, L., Y.-M. Wei, A. De La Vega Navarro, A. Garg, A.N. Hahmann, S. Khennas, I.M.L. Azevedo, A. Löschel, A.K. Singh, L. Steg, G. Strbac, and K. Wada, 2022: Ch. 6. Energy systems. In: IPCC, 2022: *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 Khouradajie, 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. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.008>
131. Dowling, J.A., K.Z. Rinaldi, T.H. Ruggles, S.J. Davis, M. Yuan, F. Tong, N.S. Lewis, and K. Caldeira, 2020: Role of long-duration energy storage in variable renewable electricity systems. *Joule*, **4** (9), 1907–1928. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.007>
132. Jenkins, J.D. and N.A. Sepulveda, 2021: Long-duration energy storage: A blueprint for research and innovation. *Joule*, **5** (9), 2241–2246. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.08.002>
133. Sepulveda, N.A., J.D. Jenkins, F.J. de Sisternes, and R.K. Lester, 2018: The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation. *Joule*, **2** (11), 2403–2420. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006>
134. Sepulveda, N.A., J.D. Jenkins, A. Edington, D.S. Mallapragada, and R.K. Lester, 2021: The design space for long-duration energy storage in decarbonized power systems. *Nature Energy*, **6** (5), 506–516. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00796-8>
135. Shan, R., J. Reagan, S. Castellanos, S. Kurtz, and N. Kittner, 2022: Evaluating emerging long-duration energy storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **159**, 112240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112240>
136. Tong, F., M. Yuan, N.S. Lewis, S.J. Davis, and K. Caldeira, 2020: Effects of deep reductions in energy storage costs on highly reliable wind and solar electricity systems. *iScience*, **23** (9), 101484. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101484>
137. Jayadev, G., B.D. Leibowicz, and E. Kutanoglu, 2020: U.S. electricity infrastructure of the future: Generation and transmission pathways through 2050. *Applied Energy*, **260**, 114267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114267>
138. Fennell, P.S., S.J. Davis, and A. Mohammed, 2021: Decarbonizing cement production. *Joule*, **5** (6), 1305–1311. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>
139. Sutherland, B.R., 2020: Sustainably heating heavy industry. *Joule*, **4** (1), 14–16. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.12.020>
140. Waite, M. and V. Modi, 2020: Electricity load implications of space heating decarbonization pathways. *Joule*, **4** (2), 376–394. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.011>
141. Brown, T., D. Schlachtberger, A. Kies, S. Schramm, and M. Greiner, 2018: Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, **160**, 720–739. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222>
142. Griffiths, S., B.K. Sovacool, J. Kim, M. Bazilian, and J.M. Uratani, 2021: Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Energy Research & Social Science*, **80**, 102208. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102208>
143. Gusain, D., M. Cvetković, R. Bentvelsen, and P. Palensky, 2020: Technical assessment of large scale PEM electrolyzers as flexibility service providers. In: 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands, 17–19 June 2020. IEEE. <https://doi.org/10.1109/isie45063.2020.9152462>
144. Reissner, R., S. You, C. Bourasseau, P. Marcuello, V. Lacroix, G. Lavaille, D.A. Greenhalgh, L. Abadia, C. Imboden, and M. Bornstein, 2019: Unified and standardized qualifying tests of electrolyzers for grid services. *3rd European Grid Service Markets Symposium*, Lucerne, Switzerland, 3–4 July 2019. <https://elib.dlr.de/129857/2/g0502-paper.pdf>
145. Ruggles, T.H., J.A. Dowling, N.S. Lewis, and K. Caldeira, 2021: Opportunities for flexible electricity loads such as hydrogen production from curtailed generation. *Advances in Applied Energy*, **3**, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100051>
146. Demirbas, A. and G. Arin, 2002: An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, **24** (5), 471–482. <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>
147. Dincer, I. and C. Acar, 2015: Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40** (34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>

148. Antonini, C., K. Treyer, A. Streb, M. van der Spek, C. Bauer, and M. Mazzotti, 2020: Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage—A techno-environmental analysis. *Sustainable Energy & Fuels*, **4** (6), 2967–2986. <https://doi.org/10.1039/d0se00222d>
149. Howarth, R.W. and M.Z. Jacobson, 2021: How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, **9** (10), 1676–1687. <https://doi.org/10.1002/ese3.956>
150. IEA, 2021: Global Hydrogen Review 2021. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
151. Chiesa, P., G. Lozza, and L. Mazzocchi, 2005: Using hydrogen as gas turbine fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **127** (1), 73–80. <https://doi.org/10.1115/1.1787513>
152. Leicher, J., T. Nowakowski, A. Giese, and K. Görner, 2017: Power-to-gas and the consequences: Impact of higher hydrogen concentrations in natural gas on industrial combustion processes. *Energy Procedia*, **120**, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.157>
153. DOE, 2021: Hydrogen Shot. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>
154. IEA, 2019: The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
155. Pasman, H.J. and W.J. Rogers, 2010: Safety challenges in view of the upcoming hydrogen economy: An overview. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23** (6), 697–704. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.002>
156. Stępień, Z., 2021: A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges. *Energies*, **14** (20). <https://doi.org/10.3390/en14206504>
157. York, W.D., W.S. Ziminsky, and E. Yilmaz, 2013: Development and testing of a low NOx hydrogen combustion system for heavy duty gas turbines. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B*, Copenhagen, Denmark, 11–15 June 2012. ASME, 1395–1405. <https://doi.org/10.1115/gt2012-69913>
158. Ocko, I.B. and S.P. Hamburg, 2022: Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **22** (14), 9349–9368. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>
159. Prather, M.J., 2003: An environmental experiment with H<sub>2</sub>? *Science*, **302** (5645), 581–582. <https://doi.org/10.1126/science.1091060>
160. Nguyen, T.T., J.S. Park, W.S. Kim, S.H. Nahm, and U.B. Beak, 2020: Environment hydrogen embrittlement of pipeline steel X70 under various gas mixture conditions with in situ small punch tests. *Materials Science and Engineering: A*, **781**, 139114. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139114>
161. Sun, M., X. Huang, Y. Hu, and S. Lyu, 2022: Effects on the performance of domestic gas appliances operated on natural gas mixed with hydrogen. *Energy*, **244**, 122557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122557>
162. Wu, X., H. Zhang, M. Yang, W. Jia, Y. Qiu, and L. Lan, 2022: From the perspective of new technology of blending hydrogen into natural gas pipelines transmission: Mechanism, experimental study, and suggestions for further work of hydrogen embrittlement in high-strength pipeline steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47** (12), 8071–8090. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.108>
163. Zhao, Y., V. McDonell, and S. Samuelsen, 2019: Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44** (47), 26049–26062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.011>
164. Zhao, Y., V. McDonell, and S. Samuelsen, 2019: Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44** (23), 12239–12253. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.100>
165. Haley, B., R.A. Jones, J.H. Williams, G. Kwok, J. Farbes, J. Hargreaves, K. Pickrell, D. Bentz, A. Waddell, and E. Leslie, 2022: Annual Decarbonization Perspective: Carbon-Neutral Pathways for the United States 2022. Evolved Energy Research. <https://www.evolved.energy/post/adp2022>
166. Caldeira, K., G. Bala, and L. Cao, 2013: The science of geoengineering. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **41** (1), 231–256. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105548>

167. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019: *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. The National Academies Press, Washington, DC, 510 pp. <https://doi.org/10.17226/25259>
168. Smith, P., S.J. Davis, F. Creutzig, S. Fuss, J. Minx, B. Gabrielle, E. Kato, R.B. Jackson, A. Cowie, E. Kriegler, D.P. van Vuuren, J. Rogelj, P. Ciais, J. Milne, J.G. Canadell, D. McCollum, G. Peters, R. Andrew, V. Krey, G. Shrestha, P. Friedlingstein, T. Gasser, A. Grubler, W.K. Heidug, M. Jonas, C.D. Jones, F. Kraxner, E. Littleton, J. Lowe, J.R. Moreira, N. Nakicenovic, M. Obersteiner, A. Patwardhan, M. Rogner, E. Rubin, A. Sharifi, A. Torvanger, Y. Yamagata, J. Edmonds, and C. Yongsung, 2016: Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Climate Change*, **6**, 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>
169. Batres, M., F.M. Wang, H. Buck, R. Kapila, U. Kosar, R. Licker, D. Nagabhushan, E. Rekhelman, and V. Suarez, 2021: Environmental and climate justice and technological carbon removal. *The Electricity Journal*, **34** (7), 107002. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.107002>
170. Lee, K., C. Fyson, and C.-F. Schlessner, 2021: Fair distributions of carbon dioxide removal obligations and implications for effective national net-zero targets. *Environmental Research Letters*, **16** (9), 094001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1970>
171. Fuhrman, J., C. Bergero, M. Weber, S. Monteith, F.M. Wang, A.F. Clarens, S.C. Doney, W. Shobe, and H. McJeon, 2023: Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy–water–land system. *Nature Climate Change*, **13** (4), 341–350. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01604-9>
172. Chiquier, S., P. Patrizio, M. Bui, N. Sunny, and N. Mac Dowell, 2022: A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO<sub>2</sub> removal pathways. *Energy and Environmental Science*, **15** (10), 4389–4403. <https://doi.org/10.1039/d2ee01021f>
173. Fankhauser, S., S.M. Smith, M. Allen, K. Axelsson, T. Hale, C. Hepburn, J.M. Kendall, R. Khosla, J. Lezaun, E. Mitchell-Larson, M. Obersteiner, L. Rajamani, R. Rickaby, N. Seddon, and T. Wetzler, 2022: The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*, **12** (1), 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
174. Novick, K.A., S. Metzger, W.R.L. Anderegg, M. Barnes, D.S. Cala, K. Guan, K.S. Hemes, D.Y. Hollinger, J. Kumar, M. Litvak, D. Lombardozzi, C.P. Normile, P. Oikawa, B.R.K. Runkle, M. Torn, and S. Wiesner, 2022: Informing nature-based climate solutions for the United States with the best-available science. *Global Change Biology*, **28** (12), 3778–3794. <https://doi.org/10.1111/gcb.16156>
175. Sedjo, R. and B. Sohngen, 2012: Carbon sequestration in forests and soils. *Annual Review of Resource Economics*, **4** (1), 127–144. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-083110-115941>
176. McQueen, N., K.V. Gomes, C. McCormick, K. Blumanthal, M. Pisciotta, and J. Wilcox, 2021: A review of direct air capture (DAC): Scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Progress in Energy*, **3** (3), 032001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abflce>
177. Griscom, B.W., J. Adams, P.W. Ellis, R.A. Houghton, G. Lomax, D.A. Miteva, W.H. Schlesinger, D. Shoch, J.V. Siikamäki, P. Smith, P. Woodbury, C. Zganjar, A. Blackman, J. Campari, R.T. Conant, C. Delgado, P. Elias, T. Gopalakrishna, M.R. Hamsik, M. Herrero, J. Kiesecker, E. Landis, L. Laestadius, S.M. Leavitt, S. Minnemeyer, S. Polasky, P. Potapov, F.E. Putz, J. Sanderman, M. Silvius, E. Wollenberg, and J. Fargione, 2017: Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114** (44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
178. Cook-Patton, S.C., T. Gopalakrishna, A. Daigneault, S.M. Leavitt, J. Platt, S.M. Scull, O. Amarjargal, P.W. Ellis, B.W. Griscom, J.L. McGuire, S.M. Yeo, and J.E. Fargione, 2020: Lower cost and more feasible options to restore forest cover in the contiguous United States for climate mitigation. *One Earth*, **3** (6), 739–752. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.11.013>
179. Van Winkle, C., J. Baker, D. Lapidus, S.B. Ohrel, J. Steller, G. Latta, and D. Birur, 2017: *Us Forest Sector Greenhouse Mitigation Potential and Implications for Nationally Determined Contributions*. RTI Press Publication No. OP-0033-1705. RTI Press, Research Triangle Park, NC. <https://doi.org/10.3768/rtipress.2017.op.0033.1705>
180. 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>

181. Bigelow, D.P. and A. Borchers, 2017: Major Uses of Land in the United States, 2012. EIB-178. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=84879>
182. Conant, R.T., C.E.P. Cerri, B.B. Osborne, and K. Paustian, 2017: Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis. *Ecological Applications*, **27** (2), 662–668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>
183. McSherry, M.E. and M.E. Ritchie, 2013: Effects of grazing on grassland soil carbon: A global review. *Global Change Biology*, **19** (5), 1347–1357. <https://doi.org/10.1111/gcb.12144>
184. Sanderson, J.S., C. Beutler, J.R. Brown, I. Burke, T. Chapman, R.T. Conant, J.D. Derner, M. Easter, S.D. Fuhlendorf, G. Grissom, J.E. Herrick, D. Liptzin, J.A. Morgan, R. Murph, C. Pague, I. Rangwala, D. Ray, R. Rondeau, T. Schulz, and T. Sullivan, 2020: Cattle, conservation, and carbon in the western Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, **75** (1), 5A–12A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.1.5a>
185. Bossio, D.A., S.C. Cook-Patton, P.W. Ellis, J. Fargione, J. Sanderman, P. Smith, S. Wood, R.J. Zomer, M. Unger, I.M. Emmer, and B.W. Griscom, 2020: The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, **3**, 391–398. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>
186. Cai, A., T. Han, T. Ren, J. Sanderman, Y. Rui, B. Wang, P. Smith, M. Xu, and Y.e. Li, 2022: Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run. *Geoderma*, **425**, 116028. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116028>
187. Lessmann, M., G.H. Ros, M.D. Young, and W. de Vries, 2022: Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management. *Global Change Biology*, **28** (3), 1162–1177. <https://doi.org/10.1111/gcb.15954>
188. Poeplau, C. and A. Don, 2015: Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **200**, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
189. D'Amato, A.W., J.B. Bradford, S. Fraver, and B.J. Palik, 2011: Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *Forest Ecology and Management*, **262** (5), 803–816. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.014>
190. Jackson, R.B. and J.S. Baker, 2010: Opportunities and constraints for forest climate mitigation. *BioScience*, **60** (9), 698–707. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.7>
191. Kaarakka, L., M. Cornett, G. Domke, T. Ontl, and L.E. Dee, 2021: Improved forest management as a natural climate solution: A review. *Ecological Solutions and Evidence*, **2** (3), e12090. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12090>
192. Lee, T.D., S.E. Eisenhaure, and I.P. Gaudreau, 2017: Pre-logging treatment of invasive glossy buckthorn (*Frangula alnus* mill.) promotes regeneration of eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Forests*, **8** (1), 16. <https://doi.org/10.3390/f8010016>
193. Moss, S.A. and E. Heitzman, 2013: The economic impact of timber harvesting practices on NIPF properties in West Virginia. In: *Proceedings, 18th Central Hardwood Forest Conference*, Miller, G.W., T.M. Schuler, K.W. Gottschalk, J.R. Brooks, S.T. Grushecky, B.D. Spong, and J.S. Rentch, Eds. Morgantown, WV, 26–28 March 2012. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 129–141. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/44060>
194. 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>
195. Powers, M.D., R.K. Kolka, J.B. Bradford, B.J. Palik, S. Fraver, and M.F. Jurgensen, 2012: Carbon stocks across a chronosequence of thinned and unmanaged red pine (*Pinus resinosa*) stands. *Ecological Applications*, **22** (4), 1297–1307. <https://doi.org/10.1890/11-0411.1>
196. Schuler, T.M., M. Thomas-Van Gundy, J.P. Brown, and J.K. Wiedenbeck, 2017: Managing Appalachian hardwood stands using four management practices: 60-year results. *Forest Ecology and Management*, **387**, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.019>
197. Byrd, K., J. Ratliff, N. Bliss, A. Wein, B. Sleeter, T. Sohl, and Z. Li, 2015: Quantifying climate change mitigation potential in the United States Great Plains wetlands for three greenhouse gas emission scenarios. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **20** (3), 439–465. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9500-0>

198. Byrd, K.B., L. Ballanti, N. Thomas, D. Nguyen, J.R. Holmquist, M. Simard, and L. Windham-Myers, 2018: A remote sensing-based model of tidal marsh aboveground carbon stocks for the conterminous United States. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **139**, 255–271. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.019>
199. Kroeger, K.D., S. Crooks, S. Moseman-Valtierra, and J. Tang, 2017: Restoring tides to reduce methane emissions in impounded wetlands: A new and potent Blue Carbon climate change intervention. *Scientific Reports*, **7** (1), 11914. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12138-4>
200. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022: *A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration*. The National Academies Press, Washington, DC, 322 pp. <https://doi.org/10.17226/26278>
201. Lampitt, R.S., E.P. Achterberg, T.R. Anderson, J.A. Hughes, M.D. Iglesias-Rodriguez, B.A. Kelly-Gerreyn, M. Lucas, E.E. Popova, R. Sanders, J.G. Shepherd, D. Smythe-Wright, and A. Yool, 2008: Ocean fertilization: A potential means of geoengineering? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **366** (1882), 3919–3945. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0139>
202. DeAngelo, J., B.T. Saenz, I.B. Arzeno-Soltero, C.A. Frieder, M.C. Long, J. Hamman, K.A. Davis, and S.J. Davis, 2023: Economic and biophysical limits to seaweed farming for climate change mitigation. *Nature Plants*, **9** (1), 45–57. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01305-9>
203. Bach, L.T., S.J. Gill, R.E.M. Rickaby, S. Gore, and P. Renforth, 2019: CO<sub>2</sub> removal with enhanced weathering and ocean alkalinity enhancement: Potential risks and co-benefits for marine pelagic ecosystems. *Frontiers in Climate*, **1**, 7. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00007>
204. Drouet, L., V. Bosetti, S.A. Padoan, L. Aleluia Reis, C. Bertram, F. Dalla Longa, J. Després, J. Emmerling, F. Fosse, K. Fragkiadakis, S. Frank, O. Fricko, S. Fujimori, M. Harmsen, V. Krey, K. Oshiro, L.P. Nogueira, L. Paroussos, F. Piontek, K. Riahi, P.R.R. Rochedo, R. Schaeffer, J.y. Takakura, K.-I. van der Wijst, B. van der Zwaan, D. van Vuuren, Z. Vrontisi, M. Weitzel, B. Zakeri, and M. Tavoni, 2021: Net zero-emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. *Nature Climate Change*, **11** (12), 1070–1076. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01218-z>
205. Jones, C.D., P. Ciais, S.J. Davis, P. Friedlingstein, T. Gasser, G.P. Peters, J. Rogelj, D.P. van Vuuren, J.G. Canadell, A. Cowie, R.B. Jackson, M. Jonas, E. Kriegler, E. Littleton, J.A. Lowe, J. Milne, G. Shrestha, P. Smith, A. Torvanger, and A. Wiltshire, 2016: Simulating the Earth system response to negative emissions. *Environmental Research Letters*, **11** (9), 095012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/095012>
206. Koven, C.D., B.M. Sanderson, and A.L.S. Swann, 2023: Much of zero emissions commitment occurs before reaching net zero emissions. *Environmental Research Letters*, **18** (1), 014017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acab1a>
207. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021: *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. The National Academies Press, Washington, DC, 328 pp. <https://doi.org/10.17226/25762>
208. OSTP, 2023: Congressionally-mandated report on solar radiation modification. White House Office of Science and Technology Policy, Washington, DC, June 30, 2023. <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/06/30/congressionally-mandated-report-on-solar-radiation-modification/>
209. Fagnant, D.J. and K. Kockelman, 2015: Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **77**, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
210. Motamedi, S., P. Wang, T. Zhang, and C.-Y. Chan, 2020: Acceptance of full driving automation: Personally owned and shared-use concepts. *Human Factors*, **62** (2), 288–309. <https://doi.org/10.1177/0018720819870658>
211. Brown, K.E. and R. Dodder, 2019: Energy and emissions implications of automated vehicles in the U.S. energy system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **77**, 132–147. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.003>
212. Massar, M., I. Reza, S.M. Rahman, S.M.H. Abdullah, A. Jamal, and F.S. Al-Ismael, 2021: Impacts of autonomous vehicles on greenhouse gas emissions—Positive or negative? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18** (11), 5567. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115567>
213. Sheppard, C.J.R., A.T. Jenn, J.B. Greenblatt, G.S. Bauer, and B.F. Gerke, 2021: Private versus shared, automated electric vehicles for U.S. personal mobility: Energy use, greenhouse gas emissions, grid integration, and cost impacts. *Environmental Science and Technology*, **55** (5), 3229–3239. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06655>

214. Abduljabbar, R.L., S. Liyanage, and H. Dia, 2021: The role of micro-mobility in shaping sustainable cities: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **92**, 102734. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102734>
215. Hidaka, K. and T. Shiga, 2018: Forecasting travel demand for new mobility services employing autonomous vehicles. *Transportation Research Procedia*, **34**, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.025>
216. Kamargianni, M., W. Li, M. Matyas, and A. Schäfer, 2016: A critical review of new mobility services for urban transport. *Transportation Research Procedia*, **14**, 3294–3303. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.277>
217. Fleming, K.L., 2018: Social equity considerations in the new age of transportation: Electric, automated, and shared mobility. *Journal of Science Policy & Governance*, **13** (1). <https://www.sciencepolicyjournal.org/uploads/5/4/3/4/5434385/fleming.pdf>
218. Jenn, A., 2020: Emissions benefits of electric vehicles in Uber and Lyft ride-hailing services. *Nature Energy*, **5** (7), 520–525. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0632-7>
219. Taiebat, M. and M. Xu, 2019: Synergies of four emerging technologies for accelerated adoption of electric vehicles: Shared mobility, wireless charging, vehicle-to-grid, and vehicle automation. *Journal of Cleaner Production*, **230**, 794–797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.142>
220. Arent, D.J., C. Barrows, S. Davis, G. Grim, J. Schaidle, B. Kroposki, M. Ruth, and B. Van Zandt, 2022: Integration of energy systems. *MRS Bulletin*, **46** (12), 1139–1152. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00244-8>
221. Ramsebner, J., R. Haas, A. Ajanovic, and M. Wietschel, 2021: The sector coupling concept: A critical review. *WIREs Energy and Environment*, **10** (4), e396. <https://doi.org/10.1002/wene.396>
222. Rodríguez Escobar, M.I., E. Cadena, T.T. Nhu, M. Cooreman-Algoed, S. De Smet, and J. Dewulf, 2021: Analysis of the cultured meat production system in function of its environmental footprint: Current status, gaps and recommendations. *Foods*, **10** (12), 2941. <https://doi.org/10.3390/foods10122941>
223. Rubio, N.R., N. Xiang, and D.L. Kaplan, 2020: Plant-based and cell-based approaches to meat production. *Nature Communications*, **11** (1), 6276. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20061-y>
224. Tubb, C. and T. Seba, 2021: Rethinking food and agriculture 2020–2030: The second domestication of plants and animals, the disruption of the cow, and the collapse of industrial livestock farming. *Industrial Biotechnology*, **17** (2), 57–72. <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29240.ctu>
225. García Martínez, J.B., K.A. Alvarado, and D.C. Denkenberger, 2022: Synthetic fat from petroleum as a resilient food for global catastrophes: Preliminary techno-economic assessment and technology roadmap. *Chemical Engineering Research and Design*, **177**, 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.017>
226. MacDougall, A.H., J. Rogelj, and P. Withey, 2021: Estimated climate impact of replacing agriculture as the primary food production system. *Environmental Research Letters*, **16** (12), 125010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3aa5>
227. Almeida, A.K., R.S. Hegarty, and A. Cowie, 2021: Meta-analysis quantifying the potential of dietary additives and rumen modifiers for methane mitigation in ruminant production systems. *Animal Nutrition*, **7** (4), 1219–1230. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.005>
228. Roque, B.M., M. Venegas, R.D. Kinley, R. de Nys, T.L. Duarte, X. Yang, and E. Kebreab, 2021: Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, **16** (3), e0247820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
229. Pape, D., J. Lewandrowski, R. Steele, D. Man, M. Riley-Gilbert, K. Moffroid, and S. Kolansky, 2016: Managing Agricultural Land for Greenhouse Gas Mitigation Within the United States. ICF International. [https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/White\\_Paper\\_WEB71816.pdf](https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/White_Paper_WEB71816.pdf)
230. Souza, R., J. Yin, and S. Calabrese, 2021: Optimal drainage timing for mitigating methane emissions from rice paddy fields. *Geoderma*, **394**, 114986. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114986>
231. Subbarao, G.V. and T.D. Searchinger, 2021: A “more ammonium solution” to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (22), e2107576118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2107576118>

232. Lelieveld, J., K. Klingmüller, A. Pozzer, R.T. Burnett, A. Haines, and V. Ramanathan, 2019: Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116** (15), 7192–7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
233. Shindell, D., M. Ru, Y. Zhang, K. Seltzer, G. Faluvegi, L. Nazarenko, G.A. Schmidt, L. Parsons, A. Challapalli, L. Yang, and A. Glick, 2021: Temporal and spatial distribution of health, labor, and crop benefits of climate change mitigation in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (46), e2104061118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2104061118>
234. Tessum, C.W., J.S. Apte, A.L. Goodkind, N.Z. Muller, K.A. Mullins, D.A. Paoletta, S. Polasky, N.P. Springer, S.K. Thakrar, J.D. Marshall, and J.D. Hill, 2019: Inequity in consumption of goods and services adds to racial–ethnic disparities in air pollution exposure. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **116** (13), 6001–6006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1818859116>
235. Tessum, C.W., J.D. Hill, and J.D. Marshall, 2017: InMAP: A model for air pollution interventions. *PLoS ONE*, **12** (4), e0176131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176131>
236. Thakrar, S.K., S. Balasubramanian, P.J. Adams, I.M.L. Azevedo, N.Z. Muller, S.N. Pandis, S. Polasky, C.A. Pope, A.L. Robinson, J.S. Apte, C.W. Tessum, J.D. Marshall, and J.D. Hill, 2020: Reducing mortality from air pollution in the United States by targeting specific emission sources. *Environmental Science & Technology Letters*, **7** (9), 639–645. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00424>
237. Vohra, K., A. Vodonos, J. Schwartz, E.A. Marais, M.P. Sulprizio, and L.J. Mickley, 2021: Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS–Chem. *Environmental Research*, **195**, 110754. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110754>
238. Murray, C.J.L., A.Y. Aravkin, P. Zheng, C. Abbafati, K.M. Abbas, et al., 2020: Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, **396** (10258), 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(20)30752-2)
239. Brook, R.D., S. Rajagopalan, C.A. Pope, J.R. Brook, A. Bhatnagar, A.V. Diez–Roux, F. Holguin, Y. Hong, R.V. Luepker, M.A. Mittleman, A. Peters, D. Siscovick, S.C. Smith, L. Whitsel, and J.D. Kaufman, 2010: Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, **121** (21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/cir.0b013e3181d8bec1>
240. Crouse, D.L., P.A. Peters, A. van Donkelaar, M.S. Goldberg, P.J. Villeneuve, O. Brion, S. Khan, D.O. Atari, M. Jerrett, C.A. Pope, M. Brauer, J.R. Brook, R.V. Martin, D. Stieb, and R.T. Burnett, 2012: Risk of nonaccidental and cardiovascular mortality in relation to long–term exposure to low concentrations of fine particulate matter: A Canadian national–level cohort study. *Environmental Health Perspectives*, **120** (5), 708–714. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104049>
241. Pope, C.A. and D.W. Dockery, 2006: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56** (6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
242. Hajat, A., C. Hsia, and M.S. O’Neill, 2015: Socioeconomic disparities and air pollution exposure: A global review. *Current Environmental Health Reports*, **2** (4), 440–450. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0069-5>
243. Liu, J., L.P. Clark, M.J. Bechle, A. Hajat, S.Y. Kim, A.L. Robinson, L. Sheppard, A.A. Szpiro, and J.D. Marshall, 2021: Disparities in air pollution exposure in the United States by race/ethnicity and income, 1990–2010. *Environmental Health Perspectives*, **129** (12), 127005. <https://doi.org/10.1289/ehp8584>
244. Mikati, I., A.F. Benson, T.J. Luben, J.D. Sacks, and J. Richmond–Bryant, 2018: Disparities in distribution of particulate matter emission sources by race and poverty status. *American Journal of Public Health*, **108** (4), 480–485. <https://doi.org/10.2105/ajph.2017.304297>
245. Tessum, C.W., D.A. Paoletta, S.E. Chambliss, J.S. Apte, J.D. Hill, and J.D. Marshall, 2021: PM<sub>2.5</sub> pollutants disproportionately and systemically affect people of color in the United States. *Science Advances*, **7** (18), 4491. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf4491>
246. Thind, M.P.S., C.W. Tessum, I.L. Azevedo, and J.D. Marshall, 2019: Fine particulate air pollution from electricity generation in the US: Health impacts by race, income, and geography. *Environmental Science & Technology*, **53** (23), 14010–14019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02527>



247. Mayfield, E.N., J.L. Cohon, N.Z. Muller, I.M.L. Azevedo, and A.L. Robinson, 2019: Quantifying the social equity state of an energy system: Environmental and labor market equity of the shale gas boom in Appalachia. *Environmental Research Letters*, **14** (12), 124072. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab59cd>
248. Markandya, A., J. Sampedro, S.J. Smith, R. Van Dingenen, C. Pizarro-Irizar, I. Arto, and M. González-Eguino, 2018: Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: A modelling study. *The Lancet Planetary Health*, **2** (3), e126–e133. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(18\)30029-9](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(18)30029-9)
249. Vandyck, T., K. Keramidas, A. Kitous, J.V. Spadaro, R. Van Dingenen, M. Holland, and B. Saveyn, 2018: Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges. *Nature Communications*, **9** (1), 4939. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06885-9>
250. Zhang, Y., S.J. Smith, J.H. Bowden, Z. Adelman, and J.J. West, 2017: Co-benefits of global, domestic, and sectoral greenhouse gas mitigation for US air quality and human health in 2050. *Environmental Research Letters*, **12** (11), 114033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8f76>
251. Zhu, S., M. Mac Kinnon, A. Carlos-Carlos, S.J. Davis, and S. Samuelsen, 2022: Decarbonization will lead to more equitable air quality in California. *Nature Communications*, **13** (1), 5738. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33295-9>
252. Gallagher, C.L. and T. Holloway, 2020: Integrating air quality and public health benefits in U.S. decarbonization strategies. *Frontiers in Public Health*, **8**, 563358. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.563358>
253. Mayfield, E.N., 2022: Phasing out coal power plants based on cumulative air pollution impact and equity objectives in net zero energy system transitions. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, **2** (2), 021004. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac70f6>
254. Sergi, B.J., P.J. Adams, N.Z. Muller, A.L. Robinson, S.J. Davis, J.D. Marshall, and I.L. Azevedo, 2020: Optimizing emissions reductions from the U.S. power sector for climate and health benefits. *Environmental Science & Technology*, **54** (12), 7513–7523. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06936>
255. Barbose, G., R. Wiser, J. Heeter, T. Mai, L. Bird, M. Bolinger, A. Carpenter, G. Heath, D. Keyser, J. Macknick, A. Mills, and D. Millstein, 2016: A retrospective analysis of benefits and impacts of U.S. renewable portfolio standards. *Energy Policy*, **96**, 645–660. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.06.035>
256. Buonocore, J.J., P. Luckow, G. Norris, J.D. Spengler, B. Biewald, J. Fisher, and J.I. Levy, 2016: Health and climate benefits of different energy-efficiency and renewable energy choices. *Nature Climate Change*, **6** (1), 100–105. <https://doi.org/10.1038/nclimate2771>
257. Dimanchev, E.G., S. Paltsev, M. Yuan, D. Rothenberg, C.W. Tessum, J.D. Marshall, and N.E. Selin, 2019: Health co-benefits of sub-national renewable energy policy in the US. *Environmental Research Letters*, **14** (8), 085012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab31d9>
258. Millstein, D., R. Wiser, M. Bolinger, and G. Barbose, 2017: The climate and air-quality benefits of wind and solar power in the United States. *Nature Energy*, **2** (9), 17134. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.134>
259. Qiu, M., C.M. Zigler, and N.E. Selin, 2022: Impacts of wind power on air quality, premature mortality, and exposure disparities in the United States. *Science Advances*, **8** (48), 8762. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn8762>
260. Siler-Evans, K., I.L. Azevedo, M.G. Morgan, and J. Apt, 2013: Regional variations in the health, environmental, and climate benefits of wind and solar generation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110** (29), 11768–11773. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221978110>
261. Grabow, M.L., S.N. Spak, T. Holloway, B. Stone, Jr., A.C. Mednick, and J.A. Patz, 2012: Air quality and exercise-related health benefits from reduced car travel in the midwestern United States. *Environmental Health Perspectives*, **120** (1), 68–76. <https://doi.org/10.1289/ehp.1103440>
262. Tong, F. and I.M.L. Azevedo, 2020: What are the best combinations of fuel-vehicle technologies to mitigate climate change and air pollution effects across the United States? *Environmental Research Letters*, **15** (7), 074046. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8a85>
263. Deetjen, T.A., L. Walsh, and P. Vaishnav, 2021: US residential heat pumps: The private economic potential and its emissions, health, and grid impacts. *Environmental Research Letters*, **16** (8), 084024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac10dc>

264. Commane, R. and L.D. Schiferl, 2022: Climate mitigation policies for cities must consider air quality impacts. *Chem*, **8** (4), 910–923. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2022.02.006>
265. Gross, S., 2020: Renewables, Land Use, and Local Opposition in the United States. The Brookings Institution, 24 pp. <https://www.brookings.edu/research/renewables-land-use-and-local-opposition-in-the-united-states/>
266. Mulvaney, D., 2017: Identifying the roots of Green Civil War over utility-scale solar energy projects on public lands across the American Southwest. *Journal of Land Use Science*, **12** (6), 493–515. <https://doi.org/10.1080/1747423x.2017.1379566>
267. Nielsen, J.A.E., K. Stavrianakis, and Z. Morrison, 2022: Community acceptance and social impacts of carbon capture, utilization and storage projects: A systematic meta-narrative literature review. *PLoS ONE*, **17** (8), e0272409. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272409>
268. Cox, E., E. Spence, and N. Pidgeon, 2020: Public perceptions of carbon dioxide removal in the United States and the United Kingdom. *Nature Climate Change*, **10** (8), 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0823-z>
269. Hernandez, R.R., S.B. Easter, M.L. Murphy-Mariscal, F.T. Maestre, M. Tavassoli, E.B. Allen, C.W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi, and M.F. Allen, 2014: Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 766–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
270. Hernandez, R.R., M.K. Hoffacker, M.L. Murphy-Mariscal, G.C. Wu, and M.F. Allen, 2015: Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112** (44), 13579–13584. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517656112>
271. Laranjeiro, T., R. May, and F. Verones, 2018: Impacts of onshore wind energy production on birds and bats: Recommendations for future life cycle impact assessment developments. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **23** (10), 2007–2023. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1434-4>
272. Hall, P.K., W. Morgan, and J. Richardson, 2022: Land Use Conflicts Between Wind and Solar Renewable Energy and Agricultural Uses. The National Agricultural Law Center. [https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1104&context=law\\_faculty](https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1104&context=law_faculty)
273. Hill, J., 2022: The sobering truth about corn ethanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (11), e2200997119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2200997119>
274. Lark, T.J., N.P. Hendricks, A. Smith, N. Pates, S.A. Spawn-Lee, M. Bougie, E.G. Booth, C.J. Kucharik, and H.K. Gibbs, 2022: Environmental outcomes of the US renewable fuel standard. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **119** (9), e2101084119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2101084119>
275. Wu, G.C., E. Leslie, O. Sawyerr, D.R. Cameron, E. Brand, B. Cohen, D. Allen, M. Ochoa, and A. Olson, 2020: Low-impact land use pathways to deep decarbonization of electricity. *Environmental Research Letters*, **15** (7), 074044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab87d1>
276. Gerrard, M.B. and E. McTiernan, 2020: New York's new statute on siting renewable energy facilities. *New York Law Journal*, **263** (93). [https://scholarship.law.columbia.edu/faculty\\_scholarship/3026](https://scholarship.law.columbia.edu/faculty_scholarship/3026)
277. Moch, J.M. and H. Lee, 2022: The Challenges of Decarbonizing the U.S. Electric Grid by 2035. Harvard University, Harvard Kennedy School, Belfer Center, Cambridge, MA. <https://www.belfercenter.org/publication/challenges-decarbonizing-us-electric-grid-2035>
278. Susskind, L., J. Chun, A. Gant, C. Hodgkins, J. Cohen, and S. Lohmar, 2022: Sources of opposition to renewable energy projects in the United States. *Energy Policy*, **165**, 112922. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112922>
279. Grubert, E. and A. Marshall, 2022: Water for energy: Characterizing co-evolving energy and water systems under twin climate and energy system nonstationarities. *WIREs Water*, **9** (2), e1576. <https://doi.org/10.1002/wat2.1576>
280. Grubert, E. and K.T. Sanders, 2018: Water use in the United States energy system: A national assessment and unit process inventory of water consumption and withdrawals. *Environmental Science & Technology*, **52** (11), 6695–6703. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00139>
281. Peer, R.A.M., E. Grubert, and K.T. Sanders, 2019: A regional assessment of the water embedded in the US electricity system. *Environmental Research Letters*, **14** (8), 084014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2daa>

282. Qin, Y., N.D. Mueller, S. Siebert, R.B. Jackson, A. AghaKouchak, J.B. Zimmerman, D. Tong, C. Hong, and S.J. Davis, 2019: Flexibility and intensity of global water use. *Nature Sustainability*, **2** (6), 515–523. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0294-2>
283. Tarroja, B., R.A.M. Peer, K.T. Sanders, and E. Grubert, 2020: How do non-carbon priorities affect zero-carbon electricity systems? A case study of freshwater consumption and cost for Senate Bill 100 compliance in California. *Applied Energy*, **265**, 114824. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114824>
284. Grubert, E., 2023: Water consumption from electrolytic hydrogen in a carbon-neutral US energy system. *Cleaner Production Letters*, **4**, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2023.100037>
285. Lampert, D.J., H. Cai, and A. Elgowainy, 2016: Wells to wheels: Water consumption for transportation fuels in the United States. *Energy & Environmental Science*, **9** (3), 787–802. <https://doi.org/10.1039/c5ee03254g>
286. Rosa, L., D.L. Sanchez, G. Realmonte, D. Baldocchi, and P. D'Odorico, 2021: The water footprint of carbon capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **138**, 110511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110511>
287. Lovering, J., M. Swain, L. Blomqvist, and R.R. Hernandez, 2022: Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. *PLoS ONE*, **17** (7), e0270155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270155>
288. BLS, 2022: Local Area Unemployment Statistics. U.S. Bureau of Labor Statistics. <https://www.bls.gov/lau/home.htm>
289. DOE, 2022: United States Energy and Employment Report 2022. U.S. Department of Energy. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-06/USEER%202022%20National%20Report\\_1.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-06/USEER%202022%20National%20Report_1.pdf)
290. DOL, n.d.: Prevailing Wage and the Inflation Reduction Act. U.S. Department of Labor, accessed May 9, 2023. <https://www.dol.gov/agencies/whd/ira>
291. NASEO and EFI, 2020: The 2019 U.S. Energy & Employment Report. National Association of State Energy Officials and Energy Futures Initiative. <https://www.naseo.org/data/sites/1/documents/publications/useer-2019-us-energy-employment-report1.pdf>
292. Mayfield, E.N., J.L. Cohon, N.Z. Muller, I.M.L. Azevedo, and A.L. Robinson, 2019: Cumulative environmental and employment impacts of the shale gas boom. *Nature Sustainability*, **2** (12), 1122–1131. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0420-1>
293. Mayfield, E., J. Jenkins, E. Larson, and C. Greig, 2021: Labor Pathways to Achieve Net-Zero Emissions in the United States by Mid-Century. USAEE Working Paper No. 21-494. U.S. Association for Energy Economics, 83 pp. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3834083>
294. Bergquist, P., M. Mildenerger, and L.C. Stokes, 2020: Combining climate, economic, and social policy builds public support for climate action in the US. *Environmental Research Letters*, **15** (5), 054019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab81c1>
295. Blyth, W., J. Speirs, and R. Gross, 2014: Low carbon jobs: The evidence for net job creation from policy support for energy efficiency and renewable energy. In: *BIEE 10th Academic Conference*. 17–18 September 2014. U.K. Energy Research Centre, 31 pp. <https://www.biee.org/wp-content/uploads/Speirs-Low-carbon-jobs-The-evidence-for-net-job-creation.pdf>
296. Pollin, R. and S. Chakraborty, 2020: Job Creation Estimates Through Proposed Economic Stimulus Measures. University of Massachusetts, Political Economy Research Institute, Amherst, MA. <https://peri.umass.edu/publication/item/1297-job-creation-estimates-through-proposed-economic-stimulus-measures>
297. Wei, M., S. Patadia, and D.M. Kammen, 2010: Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, **38** (2), 919–931. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
298. Mayfield, E. and J. Jenkins, 2021: Influence of high road labor policies and practices on renewable energy costs, decarbonization pathways, and labor outcomes. *Environmental Research Letters*, **16** (12), 124012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac34ba>
299. Bergquist, P., S. Ansolabehere, S. Carley, and D. Konisky, 2020: Backyard voices: How sense of place shapes views of large-scale energy transmission infrastructure. *Energy Research & Social Science*, **63**, 101396. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101396>

300. Chapman, A.J., B.C. McLellan, and T. Tezuka, 2018: Prioritizing mitigation efforts considering co-benefits, equity and energy justice: Fossil fuel to renewable energy transition pathways. *Applied Energy*, **219**, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.054>
301. Henry, M.S., M.D. Bazilian, and C. Markuson, 2020: Just transitions: Histories and futures in a post-COVID world. *Energy Research & Social Science*, **68**, 101668. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101668>
302. Cha, J.M., 2020: A just transition for whom? Politics, contestation, and social identity in the disruption of coal in the Powder River Basin. *Energy Research and Social Science*, **69**, 101657. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101657>
303. Pai, S., H. Zerriffi, J. Jewell, and J. Pathak, 2020: Solar has greater techno-economic resource suitability than wind for replacing coal mining jobs. *Environmental Research Letters*, **15** (3), 034065. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6c6d>
304. Carley, S., T.P. Evans, and D.M. Konisky, 2018: Adaptation, culture, and the energy transition in American coal country. *Energy Research & Social Science*, **37**, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.007>
305. Pollin, R. and B. Callaci, 2019: The economics of just transition: A framework for supporting fossil fuel-dependent workers and communities in the United States. *Labor Studies Journal*, **44** (2), 93–138. <https://doi.org/10.1177/0160449x18787051>
306. CRS, 2022: Proposed Tax Preference for Domestic Content in Energy Infrastructure. CRS Report IN11983. Congressional Research Service. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/in/in11983>
307. NETL, 2022: Energy Community Tax Credit Bonus. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. <https://energycommunities.gov/energy-community-tax-credit-bonus/>
308. Jenkins, J.D., E.N. Mayfield, E.D. Larson, S.W. Pacala, and C. Greig, 2021: Mission net-zero America: The nation-building path to a prosperous, net-zero emissions economy. *Joule*, **5** (11), 2755–2761. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.016>
309. Carley, S. and D.M. Konisky, 2020: The justice and equity implications of the clean energy transition. *Nature Energy*, **5** (8), 569–577. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0641-6>
310. Jenkins, K., D. McCauley, R. Heffron, H. Stephan, and R. Rehner, 2016: Energy justice: A conceptual review. *Energy Research & Social Science*, **11**, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.10.004>
311. Banzhaf, S., L. Ma, and C. Timmins, 2019: Environmental justice: The economics of race, place, and pollution. *Journal of Economic Perspectives*, **33** (1), 185–208. <https://doi.org/10.1257/jep.33.1.185>
312. Fefferman, N., C.-F. Chen, G. Bonilla, H. Nelson, and C.-P. Kuo, 2021: How limitations in energy access, poverty, and socioeconomic disparities compromise health interventions for outbreaks in urban settings. *iScience*, **24** (12), 103389. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103389>
313. Hernández, D., 2016: Understanding ‘energy insecurity’ and why it matters to health. *Social Science & Medicine*, **167**, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2016.08.029>
314. Lane, H.M., R. Morello-Frosch, J.D. Marshall, and J.S. Apte, 2022: Historical redlining is associated with present-day air pollution disparities in U.S. cities. *Environmental Science & Technology Letters*, **9** (4), 345–350. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c01012>
315. Brown, M., A. Soni, M. Lapsa, and K. Southworth, 2020: Low-Income Energy Affordability: Conclusions from a Literature Review. ORNL/TM-2019/1150. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory. <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/pub124723.pdf>
316. Drehobl, A. and L. Ross, 2016: Lifting the High Energy Burden in America’s Largest Cities: How Energy Efficiency Can Improve Low Income and Underserved Communities. American Council for an Energy Efficient Economy. <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/u1602.pdf>
317. Drehobl, A., L. Ross, and R. Ayala, 2020: How High Are Household Energy Burdens? An Assessment of National and Metropolitan Energy Burden across the United States. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC. <https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/u2006.pdf>
318. Lewis, J., D. Hernández, and A.T. Geronimus, 2020: Energy efficiency as energy justice: Addressing racial inequities through investments in people and places. *Energy Efficiency*, **13** (3), 419–432. <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09820-z>

319. Reames, T.G., 2016: A community-based approach to low-income residential energy efficiency participation barriers. *Local Environment*, **21** (12), 1449–1466. <https://doi.org/10.1080/13549839.2015.1136995>
320. Ross, L., A. Drehobl, and B. Stickles, 2018: The High Cost of Energy in Rural America: Household Energy Burdens and Opportunities for Energy Efficiency. American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington DC. <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/u1806.pdf>
321. Bednar, D.J. and T.G. Reames, 2020: Recognition of and response to energy poverty in the United States. *Nature Energy*, **5** (6), 432–439. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0582-0>
322. Benz, S.A. and J.A. Burney, 2021: Widespread race and class disparities in surface urban heat extremes across the United States. *Earth's Future*, **9** (7), e2021EF002016. <https://doi.org/10.1029/2021ef002016>
323. Benz, S.A., S.J. Davis, and J.A. Burney, 2021: Drivers and projections of global surface temperature anomalies at the local scale. *Environmental Research Letters*, **16** (6), 064093. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0661>
324. McDonald, R.I., T. Biswas, C. Sachar, I. Housman, T.M. Boucher, D. Balk, D. Nowak, E. Spotswood, C.K. Stanley, and S. Leyk, 2021: The tree cover and temperature disparity in US urbanized areas: Quantifying the association with income across 5,723 communities. *PLoS ONE*, **16** (4), e0249715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249715>
325. Hoffman, J.S., V. Shandas, and N. Pendleton, 2020: The effects of historical housing policies on resident exposure to intra-urban heat: A study of 108 US urban areas. *Climate*, **8** (1), 12. <https://doi.org/10.3390/cli8010012>
326. Plumer, B. and N. Popovich, 2020: How decades of racist housing policy left neighborhoods sweltering. *The New York Times*, August 24, 2020. <https://www.nytimes.com/interactive/2020/08/24/climate/racism-redlining-cities-global-warming.html>
327. Chen, M., G.A. Ban-Weiss, and K.T. Sanders, 2020: Utilizing smart-meter data to project impacts of urban warming on residential electricity use for vulnerable populations in Southern California. *Environmental Research Letters*, **15** (6), 064001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f6e>
328. Sherwin, E.D. and I.M.L. Azevedo, 2020: Characterizing the association between low-income electric subsidies and the intra-day timing of electricity consumption. *Environmental Research Letters*, **15** (9), 094089. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba030>
329. Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, and B. Xing, 2022: Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. *Nature Communications*, **13** (1), 2456. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5>
330. Scheier, E. and N. Kittner, 2022: A measurement strategy to address disparities across household energy burdens. *Nature Communications*, **13** (1), 288. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27673-y>
331. Gillingham, K., R.G. Newell, and K. Palmer, 2009: Energy efficiency economics and policy. *Annual Review of Resource Economics*, **1** (1), 597–620. <https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234>
332. Baniassadi, A., D.J. Sailor, E.S. Krayenhoff, A.M. Broadbent, and M. Georgescu, 2019: Passive survivability of buildings under changing urban climates across eight US cities. *Environmental Research Letters*, **14** (7), 074028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab28ba>
333. Sunter, D.A., S. Castellanos, and D.M. Kammen, 2019: Disparities in rooftop photovoltaics deployment in the United States by race and ethnicity. *Nature Sustainability*, **2** (1), 71–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0204-z>
334. Welton, S. and J.B. Eisen, 2019: Clean energy justice: Charting an emerging agenda. *Harvard Environmental Law Review*, **43**, 307–371. [https://scholarship.law.upenn.edu/faculty\\_scholarship/2842](https://scholarship.law.upenn.edu/faculty_scholarship/2842)
335. Carley, S., T.P. Evans, M. Graff, and D.M. Konisky, 2018: A framework for evaluating geographic disparities in energy transition vulnerability. *Nature Energy*, **3** (8), 621–627. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0142-z>
336. Jessel, S., S. Sawyer, and D. Hernández, 2019: Energy, poverty, and health in climate change: A comprehensive review of an emerging literature. *Frontiers in Public Health*, **7**, 357. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00357>
337. IEA, 2021: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
338. Lee, J., M. Bazilian, and S. Hastings-Simon, 2021: The material foundations of a low-carbon economy. *One Earth*, **4** (3), 331–334. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.015>

339. Lee, J., M. Bazilian, B. Sovacool, K. Hund, S.M. Jowitt, T.P. Nguyen, A. Månberger, M. Kah, S. Greene, C. Galeazzi, K. Awuah-Offei, M. Moats, J. Tilton, and S. Kukoda, 2020: Reviewing the material and metal security of low-carbon energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **124**, 109789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109789>
340. Sovacool, B.K., S.H. Ali, M. Bazilian, B. Radley, B. Nemery, J. Okatz, and D. Mulvaney, 2020: Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, **367** (6437), 30–33. <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>
341. Nassar, N.T. and S.M. Fortier, 2021: Methodology and Technical Input for the 2021 Review and Revision of the U.S. Critical Minerals List. USGS Open-File Report 2021-1045. U.S. Geological Survey, 31 pp. <https://doi.org/10.3133/ofr20211045>
342. U.S. Geological Survey, 2022: 2022 final list of critical minerals. *Federal Register*, **87** (37), 10381–10382. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/02/24/2022-04027/2022-final-list-of-critical-minerals>
343. Executive Office of the President, 2017: Executive Order 13817: A federal strategy to ensure secure and reliable supplies of critical minerals. *Federal Register*, **82** (246), 60835–60837. <https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899/a-federal-strategy-to-ensure-secure-and-reliable-supplies-of-critical-minerals>
344. Executive Office of the President, 2020: Executive Order 13953: Addressing the threat to the domestic supply chain from reliance on critical minerals from foreign adversaries and supporting the domestic mining and processing industries. *Federal Register*, **85** (193), 62539–62544. <https://www.federalregister.gov/documents/2020/10/05/2020-22064/addressing-the-threat-to-the-domestic-supply-chain-from-reliance-on-critical-minerals-from-foreign>
345. Executive Office of the President, 2021: Executive Order 14017: America’s supply chains. *Federal Register*, **86** (38), 11849–11854. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/03/01/2021-04280/americas-supply-chains>
346. Fortier, S.M., J.H. DeYoung Jr., E.S. Sangine, and E.K. Schnebele, 2015: Comparison of U.S. Net Import Reliance for Nonfuel Mineral Commodities—A 60-Year Retrospective (1954–1984–2014). Fact Sheet 2015–3082. U.S. Geological Survey, 4 pp. <https://doi.org/10.3133/fs20153082>
347. DOE, 2022: The Inflation Reduction Act Drives Significant Emissions Reductions and Positions America to Reach our Climate Goals. DOE/OP-0018. U.S. Department of Energy, Office of Policy, 6 pp. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/8.18%20InflationReductionAct\\_Factsheet\\_Final.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-08/8.18%20InflationReductionAct_Factsheet_Final.pdf)
348. C2ES, 2023: State Climate Policy Maps. Center for Climate and Energy Solutions. <https://www.c2es.org/content/state-climate-policy/>
349. UNFCCC, 2022: Actor Tracking. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://climateaction.unfccc.int/actors>
350. Peñasco, C., L.D. Anadón, and E. Verdolini, 2021: Systematic review of the outcomes and trade-offs of ten types of decarbonization policy instruments. *Nature Climate Change*, **11** (3), 257–265. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00971-x>
351. Agriculture Resilience Act. H.R. 2803, 117th Congress, 2021. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/2803/text>
352. SEC, 2022: SEC proposes rules to enhance and standardize climate-related disclosures for investors. U.S. Securities and Exchange Commission, Washington, DC, March 21, 2022. <https://www.sec.gov/news/press-release/2022-46>
353. Bjørn, A., S.M. Lloyd, M. Brander, and H.D. Matthews, 2022: Renewable energy certificates threaten the integrity of corporate science-based targets. *Nature Climate Change*, **12** (6), 539–546. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01379-5>
354. Curtis, Q., J. Fisch, and A.Z. Robertson, 2021: Do ESG funds deliver on their promises? *Michigan Law Review*, **120** (3). <https://doi.org/10.36644/mlr.120.3.esg>
355. GHG Protocol, 2022: Land Sector and Removals Guidance. Greenhouse Gas Protocol. <https://ghgprotocol.org/land-sector-and-removals-guidance>
356. Oldfield, E.E., A.J. Eagle, R.L. Rubin, J. Rudek, J. Sanderman, and D.R. Gordon, 2022: Crediting agricultural soil carbon sequestration. *Science*, **375** (6586), 1222–1225. <https://doi.org/10.1126/science.abl7991>

357. Amorim-Maia, A.T., I. Anguelovski, E. Chu, and J. Connolly, 2022: Intersectional climate justice: A conceptual pathway for bridging adaptation planning, transformative action, and social equity. *Urban Climate*, **41**, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101053>
358. Simon, K., G. Diprose, and A.C. Thomas, 2020: Community-led initiatives for climate adaptation and mitigation. *Kōtuitui: New Zealand Journal of Social Sciences Online*, **15** (1), 93–105. <https://doi.org/10.1080/1177083x.2019.1652659>
359. Troxler, T.G., A.C. Clement, Y. Arditi-Rocha, G. Beesing, M. Bhat, J. Bolson, C. Cabán-Alemán, K. Castillo, O. Collins, M. Cruz, A. Dodd, S.D. Evans, A.L. Fleming, C. Genatios, J. Gilbert, A. Hernandez, C. Holder, M. Ilcheva, E. Kelly, and E. Wheaton, 2021: A system for resilience learning: Developing a community-driven, multi-sector research approach for greater preparedness and resilience to long-term climate stressors and extreme events in the Miami metropolitan region. *Journal of Extreme Events*, **08** (03), 2150019. <https://doi.org/10.1142/s2345737621500196>
360. Farbes, J., B. Haley, and R. Jones, 2021: Marginal Abatement Cost Curves for U.S. Net-Zero Energy Systems: A Systems Approach. *Evolved Energy Research*, 52 pp. <https://www.evolved.energy/post/mac2-0>
361. IPCC, 2022: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3–33. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
362. Visit Florida, 2022: Florida Visitor Estimates [Webpage]. <https://www.visitflorida.org/resources/research/>
363. Visit Orlando, 2019: Orlando announces record 75 million visitors, solidifies ranking as No. 1 U.S. travel destination. Visit Orlando, Orlando, FL, May 9, 2019. <https://www.visitorlando.com/media/press-releases/post/orlando-announces-record-75-million-visitors-solidifies-ranking-as-no-1-u-s-travel-destination/>
364. FDOT, 2022: Central Florida Autonomous Vehicle Proving Ground. Florida Department of Transportation. <https://www.fdot.gov/traffic/teo-divisions.shtm/cav-ml-stamp/cv/maplocations/cf-av.shtm>
365. Ponnaluri, R., F. Heery, and V.Y. Tillander, 2017: The Florida connected and automated vehicle initiative: A focus on deployment. *ITE Journal*, **87** (10). <https://trid.trb.org/view/1484058>
366. MetroPlan Orlando, 2020: MetroPlan Orlando CAV Readiness Study: Final Report. MetroPlan Orlando. <https://metroplanorlando.gov/wp-content/uploads/MetroPlan-CAV-Readiness-7.1.20-Final.pdf>
367. USDA, 2009: Let's Glean! United We Serve Toolkit. U.S. Department of Agriculture, 8 pp. [https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/usda\\_gleaning\\_toolkit.pdf](https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/usda_gleaning_toolkit.pdf)
368. EIA, 1992: Housing Characteristics 1990. DOE/EIA-0314(90). U.S. Energy Information Administration, Washington, DC. <https://www.eia.gov/consumption/residential/index.php>
369. EIA, 1997: Manufacturing Energy Consumption Survey 1994. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/1994/index.php?view=data>
370. EIA, 2021: 2018 Manufacturing Energy Consumption Survey. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/2018/>
371. EIA, 2022: State Energy Data System (SEDS). U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/state/seds/>
372. The World Bank, 2021: World Development Indicators. World Bank Group.
373. The World Bank, 2022: World Development Indicators. World Bank Group.
374. IPCC, 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia, E., K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, and S. Federici, Eds. Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
375. Matthews, H.D., N.P. Gillett, P.A. Stott, and K. Zickfeld, 2009: The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, **459** (7248), 829–832. <https://doi.org/10.1038/nature08047>

376. Lyon, C., E.E. Saupe, C.J. Smith, D.J. Hill, A.P. Beckerman, L.C. Stringer, R. Marchant, J. McKay, A. Burke, P. O'Higgins, A.M. Dunhill, B.J. Allen, J. Riel-Salvatore, and T. Aze, 2022: Climate change research and action must look beyond 2100. *Global Change Biology*, **28** (2), 349–361. <https://doi.org/10.1111/gcb.15871>
377. McGlynn, E., S. Li, M. F. Berger, M. Amend, and K. L. Harper, 2022: Addressing uncertainty and bias in land use, land use change, and forestry greenhouse gas inventories. *Climatic Change*, **170** (1), 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03254-2>
378. Nisbet, E.G., R.E. Fisher, D. Lowry, J.L. France, G. Allen, S. Bakkaloglu, T.J. Broderick, M. Cain, M. Coleman, J. Fernandez, G. Forster, P.T. Griffiths, C.P. Iverach, B.F.J. Kelly, M.R. Manning, P.B.R. Nisbet-Jones, J.A. Pyle, A. Townsend-Small, A. al-Shalaan, N. Warwick, and G. Zazzeri, 2020: Methane mitigation: Methods to reduce emissions, on the path to the Paris Agreement. *Reviews of Geophysics*, **58** (1), e2019RG000675. <https://doi.org/10.1029/2019rg000675>
379. Saunio, M., A.R. Stavert, B. Poulter, P. Bousquet, J.G. Canadell, R.B. Jackson, P.A. Raymond, E.J. Dlugokencky, S. Houweling, P.K. Patra, P. Ciais, V.K. Arora, D. Bastviken, P. Bergamaschi, D.R. Blake, G. Brailsford, L. Bruhwiler, K.M. Carlson, M. Carrol, S. Castaldi, N. Chandra, C. Crevoisier, P.M. Crill, K. Covey, C.L. Curry, G. Etiope, C. Frankenberg, N. Gedney, M.I. Hegglin, L. Höglund-Isaksson, G. Hugelius, M. Ishizawa, A. Ito, G. Janssens-Maenhout, K.M. Jensen, F. Joos, T. Kleinen, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, G.G. Laruelle, L. Liu, T. Machida, S. Maksyutov, K.C. McDonald, J. McNorton, P.A. Miller, J.R. Melton, I. Morino, J. Müller, F. Murguia-Flores, V. Naik, Y. Niwa, S. Noce, S. O'Doherty, R.J. Parker, C. Peng, S. Peng, G.P. Peters, C. Prigent, R. Prinn, M. Ramonet, P. Regnier, W.J. Riley, J.A. Rosentreter, A. Segers, I.J. Simpson, H. Shi, S.J. Smith, L.P. Steele, B.F. Thornton, H. Tian, Y. Tohjima, F.N. Tubiello, A. Tsuruta, N. Viovy, A. Voulgarakis, T.S. Weber, M. van Weele, G.R. van der Werf, R.F. Weiss, D. Worthy, D. Wunch, Y. Yin, Y. Yoshida, W. Zhang, Z. Zhang, Y. Zhao, B. Zheng, Q. Zhu, Q. Zhu, and Q. Zhuang, 2020: The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, **12** (3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
380. Liu, M.J., K.N. Izquierdo, and D.S. Prince, 2022: Intelligent monitoring of fugitive emissions—Comparison of continuous monitoring with intelligent analytics to other emissions monitoring technologies. *The APPEA Journal*, **62**, 56–65. <https://doi.org/10.1071/aj21116>
381. Norooz Oliiae, J., N.A. Sabourin, S.A. Festa-Bianchet, J.A. Gupta, M.R. Johnson, K.A. Thomson, G.J. Smallwood, and P. Lobo, 2022: Development of a sub-ppb resolution methane sensor using a GaSb-based DFB diode laser near 3270 nm for fugitive emission measurement. *ACS Sensors*, **7** (2), 564–572. <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c02444>
382. Conrad, B.M., D.R. Tyner, and M.R. Johnson, 2023: Robust probabilities of detection and quantification uncertainty for aerial methane detection: Examples for three airborne technologies. *Remote Sensing of Environment*, **288**, 113499. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113499>
383. Hurtt, G.C., S.W. Pacala, P.R. Moorcroft, J. Caspersen, E. Shevliakova, R.A. Houghton, and B. Moore, 2002: Projecting the future of the U.S. carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **99** (3), 1389–1394. <https://doi.org/10.1073/pnas.012249999>
384. Wu, C., S.R. Coffield, M.L. Goulden, J.T. Randerson, A.T. Trugman, and W.R.L. Anderegg, 2023: Uncertainty in US forest carbon storage potential due to climate risks. *Nature Geoscience*, **16** (5), 422–429. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01166-7>
385. Kang, J.-N., Y.-M. Wei, L.-C. Liu, R. Han, B.-Y. Yu, and J.-W. Wang, 2020: Energy systems for climate change mitigation: A systematic review. *Applied Energy*, **263**, 114602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114602>
386. Bataille, C., H. Waisman, M. Colombier, L. Segafredo, and J. Williams, 2016: The deep decarbonization pathways project (DDPP): Insights and emerging issues. *Climate Policy*, **16** (sup1), S1–S6. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1179620>
387. Bistline, J.E., E. Hodson, C.G. Rossmann, J. Creason, B. Murray, and A.R. Barron, 2018: Electric sector policy, technological change, and U.S. emissions reductions goals: Results from the EMF 32 model intercomparison project. *Energy Economics*, **73**, 307–325. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.04.012>
388. Arent, D.J., P. Green, Z. Abdullah, T. Barnes, S. Bauer, A. Bernstein, D. Berry, J. Berry, T. Burrell, B. Carpenter, J. Cochran, R. Cortright, M. Curry-Nkansah, P. Denholm, V. Gevorian, M. Himmel, B. Livingood, M. Keyser, J. King, B. Kroposki, T. Mai, M. Mehos, M. Muratori, S. Narumanchi, B. Pivovar, P. Romero-Lankao, M. Ruth, G. Stark, and C. Turchi, 2022: Challenges and opportunities in decarbonizing the U.S. energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **169**, 112939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112939>



389. Costa Jr., C., E. Wollenberg, M. Benitez, R. Newman, N. Gardner, and F. Bellone, 2022: Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050. *Scientific Reports*, **12** (1), 15064. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18601-1>
390. Robertson, G.P., S.K. Hamilton, K. Paustian, and P. Smith, 2022: Land-based climate solutions for the United States. *Global Change Biology*, **28** (16), 4912–4919. <https://doi.org/10.1111/gcb.16267>
391. Roe, S., C. Streck, M. Obersteiner, S. Frank, B. Griscom, L. Drouet, O. Fricko, M. Gusti, N. Harris, T. Hasegawa, Z. Hausfather, P. Havlik, J. House, G.-J. Nabuurs, A. Popp, M.J.S. Sánchez, J. Sanderman, P. Smith, E. Stehfest, and D. Lawrence, 2019: Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nature Climate Change*, **9** (11), 817–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0591-9>
392. Denholm, P., P. Brown, W. Cole, T. Mai, and B. Sergi, 2022: Examining Supply-Side Options to Achieve 100% Clean Electricity by 2035. NREL/TP6A40-81644. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://doi.org/10.2172/1885591>
393. Rosenow, J. and N. Eyre, 2022: Reinventing energy efficiency for net zero. *Energy Research & Social Science*, **90**, 102602. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102602>
394. IEA, 2021: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
395. Clark, M. and D. Tilman, 2017: Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, **12** (6), 064016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6cd5>
396. Stehfest, E., L. Bouwman, D.P. van Vuuren, M.G.J. den Elzen, B. Eickhout, and P. Kabat, 2009: Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, **95** (1), 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9534-6>
397. Blair, N., C. Augustine, W. Cole, P. Denholm, W. Frazier, M. Geocariss, J. Jorgenson, K. McCabe, K. Podkaminer, A. Prasanna, and B. Sigrin, 2022: Storage Futures Study: Key Learnings for the Coming Decades. NREL/TP-7A40-81779. U.S. Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81779.pdf>
398. Comello, S. and S. Reichelstein, 2019: The emergence of cost effective battery storage. *Nature Communications*, **10** (1), 2038. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09988-z>
399. Bistline, J., S. Bragg-Sitton, W. Cole, B. Dixon, E. Eschmann, J. Ho, A. Kwon, L. Martin, C. Murphy, C. Namovicz, and A. Sowder, 2023: Modeling nuclear energy's future role in decarbonized energy systems. *iScience*, **26** (2), 105952. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.105952>
400. Duan, L., R. Petroski, L. Wood, and K. Caldeira, 2022: Stylized least-cost analysis of flexible nuclear power in deeply decarbonized electricity systems considering wind and solar resources worldwide. *Nature Energy*, **7** (3), 260–269. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-00979-x>
401. Carton, W., A. Asiyani, S. Beck, H.J. Buck, and J.F. Lund, 2020: Negative emissions and the long history of carbon removal. *WIREs Climate Change*, **11** (6), e671. <https://doi.org/10.1002/wcc.671>
402. Fuss, S., W.F. Lamb, M.W. Callaghan, J. Hilaire, F. Creutzig, T. Amann, T. Beringer, W. de Oliveira Garcia, J. Hartmann, T. Khanna, G. Luderer, G.F. Nemet, J. Rogelj, P. Smith, J.L.V. Vicente, J. Wilcox, M. del Mar Zamora Dominguez, and J.C. Minx, 2018: Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, **13** (6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>
403. Jägermeyr, J., C. Müller, A.C. Ruane, J. Elliott, J. Balkovic, O. Castillo, B. Faye, I. Foster, C. Folberth, J.A. Franke, K. Fuchs, J.R. Guarin, J. Heinke, G. Hoogenboom, T. Iizumi, A.K. Jain, D. Kelly, N. Khabarov, S. Lange, T.-S. Lin, W. Liu, O. Mialyk, S. Minoli, E.J. Moyer, M. Okada, M. Phillips, C. Porter, S.S. Rabin, C. Scheer, J.M. Schneider, J.F. Schyns, R. Skalsky, A. Smerald, T. Stella, H. Stephens, H. Webber, F. Zabel, and C. Rosenzweig, 2021: Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, **2** (11), 873–885. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>
404. Stehfest, E., W.-J. van Zeist, H. Valin, P. Havlik, A. Popp, P. Kyle, A. Tabeau, D. Mason-D'Croz, T. Hasegawa, B.L. Bodirsky, K. Calvin, J.C. Doelman, S. Fujimori, F. Humpenöder, H. Lotze-Campen, H. van Meijl, and K. Wiebe, 2019: Key determinants of global land-use projections. *Nature Communications*, **10** (1), 2166. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09945-w>

405. Strefler, J., E. Kriegler, N. Bauer, G. Luderer, R.C. Pietzcker, A. Giannousakis, and O. Edenhofer, 2021: Alternative carbon price trajectories can avoid excessive carbon removal. *Nature Communications*, **12** (1), 2264. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22211-2>
406. Workman, M., K. Dooley, G. Lomax, J. Maltby, and G. Darch, 2020: Decision making in contexts of deep uncertainty—An alternative approach for long-term climate policy. *Environmental Science & Policy*, **103**, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.10.002>
407. Peng, W., G. Iyer, V. Bosetti, V. Chaturvedi, J. Edmonds, A.A. Fawcett, S. Hallegatte, D.G. Victor, D. van Vuuren, and J. Weyant, 2021: Climate policy models need to get real about people—Here’s how. *Nature*, **594** (7862), 174–176. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01500-2>
408. Brown, M.A., P. Dwivedi, S. Mani, D. Matisoff, J.E. Mohan, J. Mullen, M. Oxman, M. Rodgers, R. Simmons, B. Beasley, and L. Polepeddi, 2021: A framework for localizing global climate solutions and their carbon reduction potential. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (31), e2100008118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2100008118>
409. Daley, D.M., T.D. Abel, M. Stephan, S. Rai, and E. Rogers, 2023: Can polycentric governance lower industrial greenhouse gas emissions: Evidence from the United States. *Environmental Policy and Governance*. <https://doi.org/10.1002/eet.2051>
410. Hultman, N.E., Clarke, L., C. Frisch, K. Kennedy, H. McJeon, T. Cyr, P. Hansel, P. Bodnar, M. Manion, M.R. Edwards, R. Cui, C. Bowman, J. Lund, M.I. Westphal, A. Clapper, J. Jaeger, A. Sen, J. Lou, D. Saha, W. Jaglom, K. Calhoun, K. Igusky, J. deWeese, K. Hammoud, J.C. Altimirano, M. Dennis, C. Henderson, G. Zwicker, and J. O’Neill, 2020: Fusing subnational with national climate action is central to decarbonization: The case of the United States. *Nature Communications*, **11** (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18903-w>
411. Peng, W., G. Iyer, M. Binsted, J. Marlon, L. Clarke, J.A. Edmonds, and D.G. Victor, 2021: The surprisingly inexpensive cost of state-driven emission control strategies. *Nature Climate Change*, **11** (9), 738–745. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01128-0>
412. Wakiyama, T. and E. Zusman, 2021: The impact of electricity market reform and subnational climate policy on carbon dioxide emissions across the United States: A path analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **149**, 111337. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111337>
413. NC Clean Energy Technology Center, 2022: Database of State Incentives for Renewables & Efficiency. NC State University, NC Clean Energy Technology Center, accessed August 19, 2022. <https://www.dsireusa.org/>
414. CDP, 2023: States and Regions Climate Tracker. CDP Worldwide. <https://www.cdp.net/en/research/global-reports/states-and-regions-climate-action-tracker>
415. UNFCCC, 2023: Global Climate Action. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://climateaction.unfccc.int/>
416. ETC, 2018: Mission Possible: Reaching Net-Zero Carbon Emissions from Harder-to-Abate Sectors. Energy Transitions Commission. <https://www.energy-transitions.org/publications/mission-possible/>
417. Grubert, E. and S. Hastings-Simon, 2022: Designing the mid-transition: A review of medium-term challenges for coordinated decarbonization in the United States. *WIREs Climate Change*, **13** (3), e768. <https://doi.org/10.1002/wcc.768>
418. Baker, E., A.P. Goldstein, and I.M.L. Azevedo, 2021: A perspective on equity implications of net zero energy systems. *Energy and Climate Change*, **2**, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100047>
419. Johnson, J.X. and J. Novacheck, 2015: Emissions reductions from expanding state-level renewable portfolio standards. *Environmental Science & Technology*, **49** (9), 5318–5325. <https://doi.org/10.1021/es506123e>
420. Wiser, R., T. Mai, D. Millstein, G. Barbose, L. Bird, J. Heeter, D. Keyser, V. Krishnan, and J. Macknick, 2017: Assessing the costs and benefits of US renewable portfolio standards. *Environmental Research Letters*, **12** (9), 094023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa87bd>
421. Young, D. and J. Bistline, 2018: The costs and value of renewable portfolio standards in meeting decarbonization goals. *Energy Economics*, **73**, 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.04.017>