Efectos costeros



Capítulo 9. Efectos costeros

Autores y colaboradores

Autor principal de coordinación federal

Mark S. Osler, National Oceanic and Atmospheric Administration

Autor principal del capítulo

Christine L. May, Pathways Climate Institute

Autor principal del capítulo de la agencia

Hilary F. Stockdon, US Geological Survey

Autores del capítulo

Patrick L. Barnard, US Geological Survey

John A. Callahan, NOAA Center for Operational Oceanographic Products and Services

Renee C. Collini, The Water Institute of the Gulf

Celso M. Ferreira, George Mason University

Juliette Finzi Hart, Pathways Climate Institute

Erika E. Lentz, US Geological Survey

Tucker B. Mahoney, Independent Coastal Engineer

William Sweet, NOAA National Ocean Service

Dan Walker, EA Engineering, Science, and Technology Inc.

Christopher P. Weaver, US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development

Contribuyentes técnicos

Jamie Carter, NOAA National Ocean Service

Patrick S. O'Brien, US Army Corps of Engineers

Brittney W. Parker, NOAA National Ocean Service

Daisy R. Ramirez Lopez, Pathways Climate Institute

Editor revisor

Hannah Baranes, Gulf of Maine Research Institute

Arte de apertura de capítulo

Joan Hart



Índice de Contenidos

Introducción	5
Mensaje clave 9.1	
Aumentan los riesgos costeros debido a la aceleración de la subida	
del nivel del mar y al cambio de los patrones de las tormentas	6
Aceleración del aumento del nivel del mar	
Seguirá aumentando la frecuencia de las inundaciones	9
Las olas, las tormentas y la variabilidad del paisaje	
amplifican el riesgo de inundaciones	12
Mensaje clave 9.2	
Los impactos costeros sobre las personas y los ecosistemas	
aumentan debido al cambio climático	12
Impacto en las comunidades y las personas	14
La resiliencia natural de la costa está cambiando	16
Mensaje clave 9.3	
La adaptación reduce el riesgo y aporta beneficios	
adicionales a las comunidades costeras	17
Recuadro 9.1. De camino a la adaptación: Norfolk, Virginia	20
Soluciones basadas en la naturaleza paral as comunidades costeras	21
Estrategias de reubicación planificada en comunidades costeras	21
Oportunidades de adaptación transformadora	
en las comunidades costeras	22
Cuentas trazables	23
Descripción del proceso	23
Mensaje clave 9.1	24
Mensaje clave 9.2	25
Mensaje clave 9.3	27
Referencias	31

Introducción

Las costas de nuestra Nación sustentan industrias, comercios, comunidades, culturas, tradiciones y actividades recreativas, al tiempo que proporcionan paisajes emblemáticos y diversos servicios ecosistémicos. El aumento del nivel del mar (sea level rise, SLR) observado y los cambios en la frecuencia y la intensidad de las tormentas extremas, junto con los cambios en el uso y la ocupación de la tierra que pueden magnificar el riesgo de inundaciones, tienen un impacto negativo significativo y demostrable en las personas que viven y trabajan a lo largo de la costa. Se espera que los impactos empeoren en las próximas décadas a medida que el SLR siga acelerándose. Las tendencias observadas y proyectadas varían a lo largo de las costas de nuestra Nación (KM 9.1); por lo tanto, la consideración de las tendencias locales y regionales es importante al momento de evaluar los impactos (KM 9.2) y la adaptación (KM 9.3)^{1, 2}.

El número de personas que viven en zonas costeras expuestas al riesgo de inundación por el SLR (inundación permanente por las mareas altas diarias) o por oleaje (inundación temporal provocada por tormentas) está en continuo cambio³. Entre 1990 y 2020, el número de personas que viven por debajo de las elevaciones de marea alta de más 3.3 pies (1 m) de SLR se incrementó entre un 14 % y un 18 % hasta alcanzar los 2.2 millones, consistente con el crecimiento y el desarrollo continuo³. Las modificaciones humanas de los paisajes costeros, como diques y malecones, pueden agravar el riesgo de inundaciones y la erosión^{4, 5, 6} y afectar la capacidad de adaptación natural de los ecosistemas costeros⁷.

Los desastres meteorológicos siguen aumentando en las costas estadounidenses (KM 2.2, 3.5), y el SLR amplifica las inundaciones y los impactos en las comunidades costeras. Entre 2000 y 2021, 38 ciclones tropicales causaron más de \$1 billón en pérdidas (en dólares de 2022) y 6,200 muertes⁸. Las medidas federales, estatales y locales para reducir estas pérdidas están en marcha, pero el progreso es lento, y las desigualdades sustanciales de riqueza, las brechas sistemáticamente sostenidas en los recursos y la capacidad y las injusticias del pasado siguen impactando de manera dispar a las comunidades de primera línea, lo que incluye tribus y pueblos indígenas, comunidades rurales y poblaciones de bajos ingresos (KM 20.1). Es difícil desvincular las vulnerabilidades y consecuencias asociadas al cambio climático de las historias y desigualdades raciales que dieron forma a los sistemas socioambientales que existen en la actualidad⁹. Sin embargo, los esfuerzos de adaptación al clima que incorporan consideraciones de equidad apoyan la justicia medioambiental y se centran en las comunidades locales pueden tener más posibilidades de éxito, utilizando estrategias de adaptación que van desde protección en el lugar hasta reubicación planificada^{10, 11, 12}.

El aumento de los desastres meteorológicos y del SLR también incrementa los impactos sobre los ecosistemas costeros y los litorales naturales, lo que ocasiona cambios graduales (p. ej., migración de los humedales hacia el interior) o bruscos (p. ej., erosión de dunas y acantilados por las tormentas) que aumentan los riesgos de inundación y los daños a las comunidades costeras y a las principales infraestructuras (p. ej., autopistas, ferrocarriles, puertos, aeropuertos y otras infraestructuras fundamentales; KM 12.2). Los impactos combinados requerirán una reimaginación fundamental de la costa. Las estructuras de protección pueden reducir los riesgos de forma provisional; sin embargo, muchas comunidades y las infraestructuras de las que dependen necesitarán una reubicación gradual en terrenos más elevados, lo que puede proporcionar espacio para que los ecosistemas costeros se adapten (KM 8.1). En algunos lugares, la reubicación coordinada y deliberada de las zonas costeras, implementada de forma equitativa, será esencial para reducir el riesgo futuro para la vida y los medios de subsistencia (KM 31.1)^{13, 14, 15}.

Mensaje clave 9.1

Aumentan los riesgos costeros debido a la aceleración de la subida del nivel del mar y al cambio de los patrones de las tormentas

La severidad y los riesgos de los peligros costeros en toda la Nación están aumentando (*muy probable*, *confianza alta*), debido a la aceleración del aumento del nivel del mar y a los cambios en los patrones de las tormentas, que provocan aumento de las inundaciones, la erosión y la elevación de las capas freáticas. En los próximos 30 años (2020-2050), se espera que el nivel del mar a lo largo de las costas de los EE. UU. contiguos suba alrededor de 11 pulgadas (28 cm) o tanto como el aumento observado en los últimos 100 años (*probable*, *confianza alta*). En respuesta, las inundaciones costeras ocurrirán de 5 a 10 veces más a menudo en 2050 que en 2020 en la mayoría de los lugares, con inundaciones perjudiciales que ocurrirán tan a menudo como las perturbadoras "inundaciones de marea alta" de ahora si no se toman medidas (*muy probable*, *confianza alta*).

Aceleración del aumento del nivel del mar

El nivel medio global del mar está aumentando a una tasa acelerada, con una tasa promedio de aproximadamente 0.05 ± 0.01 pulgadas al año $(1.2 \pm 0.2 \text{ mm} \text{ al año})$ en la era anterior a los satélites $(1901-1990)^{16}$ que casi se triplicó hasta alcanzar 0.13 ± 0.02 pulgadas al año $(3.4 \pm 0.4 \text{ mm} \text{ al año})$ durante los 30 años de la era de los satélites $(1993-2022)^{17}$ debido a la expansión térmica por el calentamiento de las aguas y a la creciente contribución del deshielo de glaciares y capas de hielo¹⁸. Las tasas globales de SLR se aceleraron aún más hasta alcanzar 0.17 pulgadas al año (4.4 mm al año) durante la última década (2013-2022), aunque esta aceleración puede incluir componentes de variabilidad natural debido al corto período¹⁹.

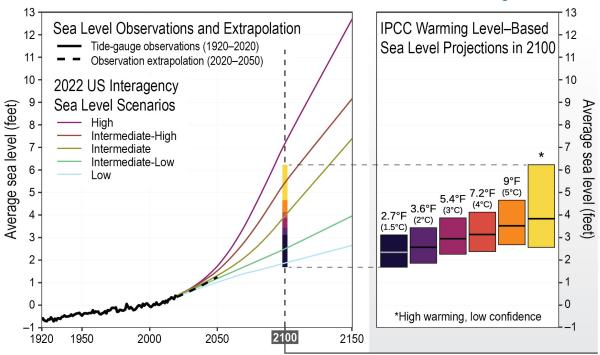
Para ayudar a las comunidades a planificar un futuro incierto, el Grupo de Trabajo Interinstitucional sobre el Aumento del Nivel del Mar de Estados Unidos estableció cinco escenarios futuros de SLR que abarcan la gama de cantidades recomendables de SLR para 2100 utilizando el consenso científico más reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) y otros organismos científicos². Los cinco escenarios de SLR representan la gama a escala global, con las cantidades de SLR proyectadas en 2100 y escenarios definidos de la siguiente manera:

- Bajo, aumento de 1 pie (0.3 m) del nivel medio global del mar en relación con la línea de base del año 2000.
- Intermedio-bajo, 1.6 pies (0.5 m).
- Intermedio, 3.3 pies (1.0 m).
- Intermedio-alto, 4.9 pies (1.5 m).
- Alto, 6.6 pies (2.0 m) (Figura 9.1).

Los escenarios de SLR se reducen a escala local y regional, y tienen en cuenta los cambios futuros en la elevación de la tierra, el calentamiento y la circulación del océano y la gravitación y la rotación de la Tierra por el deshielo de los hielos terrestres. Se construyen directamente a partir de las proyecciones basadas en las emisiones y la temperatura del Sexto Informe de Evaluación (Sixth Assessment Report, AR6) del IPCC (Apéndice 3.3)²⁰, pero utilizan un marco consistente (p. ej., Sweet *et al.* 2017²¹) para apoyar la planificación de la reducción de riesgos.

El nivel del mar está subiendo a lo largo de las costas de los EE. UU. contiguos más rápidamente que el promedio global, con unas 11 pulgadas (28 cm; rango *probable* de 10 a 12 pulgadas [25-30 cm]) en los últimos 100 años (1920-2020) y aproximadamente la mitad de este aumento (5-6 pulgadas [13-15 cm]) en los últimos 30 años (1990-2020; Figura 9.1)². Las tasas de SLR varían según las regiones. En los últimos 30 años, el mayor aumento se observa a lo largo del oeste de la Costa del Golfo de los EE. UU. (alrededor de 9 pulgadas [23 cm]), en gran parte debido a las altas tasas de subsidencia de la tierra²² de las aguas subterráneas y a la extracción de combustibles fósiles²³. A lo largo del Atlántico nororiental y suroriental y del este de las Costas del Golfo se observa un aumento de 6 pulgadas (15 cm). Se observan tasas de aumento inferiores a lo largo de las costas de Hawaii y de las islas del Caribe estadounidense (4 pulgadas [10 cm]) y de las costas del Pacífico noroccidental (2 pulgadas [5 cm]) y suroccidental (3 pulgadas [8 cm])².

Aceleración del aumento relativo del nivel del mar en los EE. UU. contiguos



Se proyecta que el nivel del mar siga aumentando este siglo en cantidades relacionadas con los futuros niveles de calentamiento global.

Figura 9.1. Esta figura muestra las tendencias de aceleración del aumento del nivel del mar (sea level rise, SLR) y los escenarios de SLR a lo largo de la costa de los EE. UU. contiguos. También muestra la relación entre el SLR proyectado según diferentes aumentos de la temperatura global en superficie en 2100 (KM 2.2). El panel izquierdo muestra el aumento promedio del nivel del mar observado durante 1920-2020 (línea negra continua), una extrapolación hasta 2050 basada en los niveles del mar observados durante 1970-2020 (línea negra discontinua), una serie de escenarios que describen un aumento recomendable del nivel del mar hasta 2150 (líneas multicolores) y una barra apilada superpuesta que muestra una serie de cambios proyectados en el SLR de 2100 según diferentes niveles de aumento de la temperatura global en superficie, basados en el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. El panel derecho muestra versiones ampliadas de las proyecciones que aparecen en la barra apilada del panel izquierdo. Las líneas negras indican el valor mediano, las barras muestran la extensión del rango probable (percentil 17-83) de SLR para 2100, y los niveles de calentamiento asociados se indican encima de cada barra. El caso "alto calentamiento, confianza baja" (barra amarilla) se refiere al rango potencial de aumento de los mares con temperaturas más altas con un rápido deshielo. La falta de coincidencia en 2100 entre el escenario de alto nivel del mar y el caso de "alto calentamiento, confianza baja" no es una indicación de sobreestimación, sino más bien el resultado de cómo se analizan los procesos de confianza baja. Adaptado de Sweet et al. 2022².

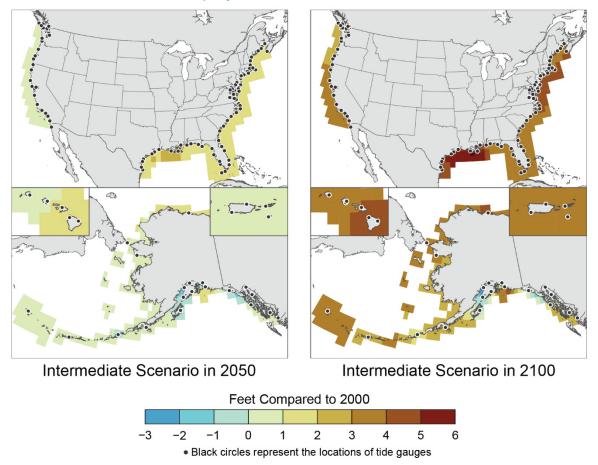
La supresión y aceleración de la tasa de SLR a lo largo de las costas del Pacífico Noroccidental y Suroccidental se debe en parte a los forzamientos oceanográficos asociados a El Niño-Oscilación Sur (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) y a la oscilación por décadas del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation, PDO)²⁴. A lo largo de la costa del Pacífico, el ENSO y la PDO seguirán impulsando la variabilidad por décadas del SLR, con tasas que se sitúan por encima o por debajo del promedio global²⁴. La tasa actual sigue siendo superior al promedio global²⁴. La caracterización de la elevación pasada (y futura) de Alaska y de las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. es complicada debido a los efectos tectónicos que causan tanto la elevación como la subsidencia. Los cambios interanuales asociados a la variabilidad natural también pueden modificar los índices a lo largo de distintos períodos de análisis, como la variabilidad de 8-12 pulgadas (20-30 cm) en el nivel del mar que puede producirse a lo largo de la costa del Pacífico durante las distintas fases del ENSO^{25, 26, 27}

De cara al futuro, se espera un aumento promedio de 11 pulgadas (28 cm) a lo largo de la costa de los EE. UU. contiguos para 2050 (en relación con 2020, con un rango *probable* de 9-13 pulgadas [23-33 cm]; vea la Tabla A1.2 en Sweet *et al.* 2022² para conocer las compensaciones de 2000 a 2020) según una trayectoria de SLR basada en observaciones (Figura 9.1). Un aumento de 11 pulgadas (28 cm) para 2050 coincide con el SLR promedio observado a lo largo de la costa de los EE. UU. contiguos durante los últimos 100 años (1920-2020), lo que representa una aceleración en curso del SLR que se sitúa entre los escenarios de nivel del mar intermedio-bajo e intermedio². En 2050, las cantidades de SLR seguirán variando geográficamente, con diferencias regionales como las observadas en el registro histórico reciente (p. ej., 1990-2020). Por ejemplo, en el escenario de nivel del mar intermedio, que coincide con la mayoría de las trayectorias regionales de SLR², se espera que el SLR sea mayor en la costa del Atlántico que en la costa del Pacífico y mayor en el oeste de la Costa del Golfo (Figura 9.2).

Más allá de 2050, las futuras emisiones globales y el calentamiento marino y atmosférico resultante, así como las respuestas de los mantos de hielo, determinarán el SLR futuro. A partir de 2021, las temperaturas globales han aumentado en 2 °F-2.2 °F (1.1 °C-1.2 °C) por encima de los niveles preindustriales (KM 2.1) y se dirigen a un nivel de calentamiento de alrededor de 5.4 °F (3 °C) para 2100 según la trayectoria actual²⁸, lo que concuerda con los escenarios intermedio y alto del AR6 del IPCC (SSP2-4.5 y SSP3-7.0). Con este calentamiento, es *probable* que el escenario de nivel del mar intermedio-bajo con más de 2 pies (más de 0.6 m) de SLR en relación con los niveles de 2020 se supere en 2100, y que los más de 3.6 pies (más de 1.1 m) se superen en 2150 (Apéndice 3.3; Figura 9.1)².

No frenar las emisiones futuras aumenta la probabilidad de un SLR equivalente al escenario del nivel del mar intermedio o quizás incluso superior, como los escenarios del nivel del mar intermedio-alto y alto asociados al escenario muy alto del IPCC (SSP5-8.5) que incluye la adición de un rápido deshielo o desintegración de la capa de hielo durante este siglo²⁰. La posibilidad de este resultado de baja probabilidad aumenta con niveles de calentamiento global más altos²⁹. En los escenarios de nivel del mar de intermedio a alto, se produciría un SLR promedio de aproximadamente 3.6-6.9 pies (1.1-2.1 m) a lo largo de las costas de los EE. UU. contiguos en 2100 y de 6.9-12.5 pies (2.1-3.8 m) en 2150 con respecto a 2020 (Figura 9.1; Apéndice 3.3)². En los escenarios de nivel del mar intermedio-alto y alto, las contribuciones de la capa de hielo de la Antártida dominan y reducen las diferencias globales de SLR entre las regiones de los EE. UU. (KM 2.1, 2.3)². Más allá de 2150, el SLR global (y de los EE. UU.) continuará durante milenios debido a los efectos a largo plazo del calentamiento de este siglo. Es *probable* que en los próximos 2,000 años se produzcan entre 7 y 33 pies (2-10 metros) de SLR global si las temperaturas se calientan entre 3.6 °F y 5.4 °F (de 2 °C a 3 °C) por encima de los niveles preindustriales para 2100, similares a las condiciones de hace unos 125,000 años.

Aumento del nivel del mar proyectado



Para 2050 y 2100, según el escenario de nivel del mar intermedio, se proyecta que el aumento del nivel del mar será mayor en la costa del Atlántico que en la costa del Pacífico y mayor en el oeste de la Costa del Golfo.

Figura 9.2. La figura muestra el aumento relativo del nivel del mar a lo largo de las costas de los EE. UU. en el escenario de aumento del nivel del mar intermedio del Grupo de Trabajo Interinstitucional sobre el Aumento del Nivel del Mar de Estados Unidos² para 2050 (**izquierda**) y 2100 (**derecha**). En la parte superior se muestra el aumento relativo del nivel del mar en los EE. UU. contiguos, y en la parte inferior, en Alaska, Hawaii (recuadros de la izquierda) y Puerto Rico (recuadros de la derecha). Los puntos negros a lo largo de la costa indican las ubicaciones de los mareógrafos utilizados para caracterizar el SLR pasado. La caracterización del SLR pasado (y futuro) en Alaska y las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. es complicada debido a los efectos tectónicos que causan tanto el levantamiento como la subsidencia. Créditos de la figura: NOAA National Ocean Service.

Seguirá aumentando la frecuencia de las inundaciones

El SLR seguirá provocando la inundación permanente de tierras que antes estaban secas y una escalada de la severidad (profundidad, extensión geográfica y frecuencia) de las inundaciones costeras, desde fuertes tormentas hasta inundaciones por mareas altas (high tide flooding, HTF) más frecuentes. A partir de 2020, las frecuencias anuales más altas de inundaciones costeras —definidas de forma consistente a nivel nacional como impactos leves (HTF disruptiva, unos 1.75-2 pies [0.5-0.6 m] por encima de la marea alta promedio), moderados (HTF perjudicial, unos 2.75-3 pies [0.8-0.9 m]) y graves (HTF destructiva, unos 4 pies [1.2 m])^{2, 31}— se producen a lo largo de las costas del Atlántico nororiental y del oeste del Golfo (Figura 9.3), debido en parte a una mayor exposición a fuertes tormentas y a plataformas continentales anchas y poco profundas que permiten marejadas ciclónicas más altas³².

Las frecuencias anuales de inundaciones costeras leves y moderadas aumentaron entre 2 y 3 veces a lo largo de la mayoría de las costas del Atlántico y del Golfo entre 1990 y 2020 (Figura 9.3). Los eventos de HTF leves, que son el impacto más común del SLR, ocurren varias veces al año con frecuencias cada vez más aceleradas (p. ej., Sweet *et al.* 2019³³; 2020³⁴; 2021³⁵). Un evento típico de HTF dura unos dos días y varias mareas altas². A lo largo de las costas de Hawaii, las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU. y las islas del Caribe estadounidense, así como en algunas costas del Pacífico de los EE. UU., el SLR es un problema creciente. Los impactos de las inundaciones se producen con alturas de inundación mucho menores que las que se muestran en la Figura 9.3, incluso en algunos casos en los que los niveles de agua se elevan solo ligeramente por encima de la marea alta.

Para 2050, en el escenario de nivel del mar intermedio (Figura 9.1), las frecuencias de inundaciones costeras leves, moderadas y graves aumentarán en un factor de entre 5 y 10 en muchas regiones con respecto a 2020 en ausencia de adaptación (Figura 9.3). En efecto, se produciría un cambio en el régimen de inundaciones; por ejemplo, se proyecta que las frecuencias de las inundaciones moderadas se produzcan con la misma frecuencia con la que se producen actualmente las HTF leves y disruptivas (hacia 2020). En 2100, según el escenario del nivel del mar intermedio, se producirían inundaciones graves casi a diario a lo largo de las costas estadounidenses². Estos aumentos en la frecuencia de las inundaciones podrían amplificarse aún más con mayores cantidades de SLR, el empeoramiento de las condiciones de las tormentas, la variabilidad climática natural (p. ej., ENSO) u otras razones como los ciclos de mareas a largo plazo y la subsidencia o levantamiento de la tierra^{31, 36}.

Frecuencias promedio regionales de inundación en los EE. UU.

Minor flooding is disruptive



- · Shallow flooding in the most vulnerable locations near waterfront and shoreline
- Low threat of property damage
- · 1 to 2 feet of flooding in shoreline and vulnerable areas

Moderate flooding is damaging



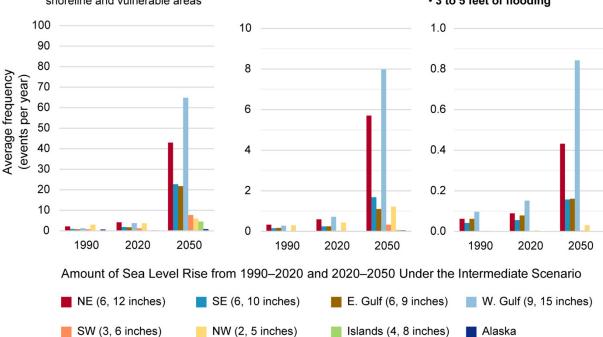
- · Widespread flooding of vulnerable areas
- · Elevated threat of property damage
- · 2 to 3 feet of flooding in shoreline and vulnerable areas

Major flooding is destructive



- · Severe flooding will cause extensive inundation and flooding of numerous roads and buildings
- · Significant threat to property and life
- · 3 to 5 feet of flooding

Alaska



Las frecuencias de inundaciones costeras leves, moderadas y graves aumentarán en un factor de entre 5 y 10 en muchas regiones de los EE. UU. en relación con 2020 en ausencia de adaptación.

Islands (4, 8 inches)

NW (2, 5 inches)

Figura 9.3. (arriba) Las descripciones de tres tipos de inundaciones costeras -leves (disruptivas), moderadas (perjudiciales) y graves (destructivas) - proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional de la NOAA reflejan las vulnerabilidades actuales de las comunidades costeras (abajo). Estos gráficos muestran las frecuencias promedio anuales de inundaciones leves, moderadas y graves por región (barras multicolores). Las frecuencias de inundación se basan en un conjunto de 187 mareógrafos de la NOAA, con 14 en Hawaii y las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU., 4 en Puerto Rico y 4 en las Islas Vírgenes de los EE. UU. (que se muestran colectivamente como "Islas"). Observe que esta figura utiliza las regiones estadounidenses definidas en Sweet et al. (2022)2, que difieren de las regiones de la Quinta Evaluación Nacional del Clima (Fifth National Climate Assessment, NCA5): NE = Atlántico Noreste, SE = Atlántico Sureste, NW = Pacífico Noroeste, SW = Pacífico Suroeste, E. Gulf = este del Golfo, W. Gulf = oeste del Golfo. Se muestran las observaciones para 1990 y 2020, y las proyecciones para 2050 en el escenario del nivel del mar intermedio de todas las regiones costeras de los EE. UU. La cantidad de SLR para cada región durante 1990-2020 y 2020-2050 en el escenario intermedio se proporciona debajo del gráfico. La cantidad de SLR en Alaska no se muestra porque el SLR de Alaska varía a lo largo de la costa debido tanto al

levantamiento tectónico como a la subsidencia; los valores de SLR en Alaska se muestran en la Figura 9.2. Se proyecta que las frecuencias promedio anuales de inundaciones leves, moderadas y graves aumenten más en los próximos 30 años (2020-2050) que en los últimos 30 años (1990-2020), independientemente de cualquier empeoramiento futuro de las tormentas. En algunas regiones del Atlántico y de la Costa del Golfo expuestas a huracanes es posible que se produzcan inundaciones costeras más severas y catastróficas, que serán más probables a medida que suba el nivel del mar. Créditos de la figura: NOAA National Ocean Service. Créditos de las fotografías: (izquierda) City of Norfolk Staff Photographer Andrew Cooper; (centro y derecha) Jeff Orrock, NOAA.

Las olas, las tormentas y la variabilidad del paisaje amplifican el riesgo de inundaciones

Los cambios en el nivel de las aguas costeras provocados por el clima, lo que incluye olas, marejadas ciclónicas, caudales fluviales y cambios en el paisaje, son consideraciones importantes al planificar el riesgo futuro de inundaciones^{37, 38, 39}. Los niveles de agua provocados por las olas, por ejemplo, incluyen entre el 25 % y el 90 % de los niveles extremos de agua costeras a lo largo de las costas estadounidenses expuestas^{2, 40, 41}. En la mayoría de las costas estadounidenses, muchos eventos extremos están aumentando en intensidad, frecuencia y extensión geográfica (KM 2.2) debido al cambio climático provocado por actividades humanas (KM 3.1). Por ejemplo, los huracanes se intensifican más rápidamente y decaen más lentamente, lo que provoca tormentas más fuertes que se extienden más tierra adentro, con precipitaciones más intensas y marejadas ciclónicas más elevadas, por lo que las comunidades disponen de menos tiempo para prepararse (KM 2.2). El cambio climático también está incrementando los peligros costeros a través de cambios en la frecuencia, la magnitud y los impactos de los eventos compuestos (Figura 9.3; enfoque en eventos compuestos)^{42, 43}. En las zonas costeras, las inundaciones compuestas suelen deberse a la ocurrencia conjunta de fuertes precipitaciones, caudales fluviales elevados, niveles elevados de aguas subterráneas, saturación del suelo y niveles elevados de agua marina^{38, 44, 45}.

Mensaje clave 9.2

Los impactos costeros sobre las personas y los ecosistemas aumentan debido al cambio climático

El aumento del nivel del mar provocado por el cambio climático, entre otros factores, está afectando la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades costeras (*muy probable*, *confianza alta*). Los impactos del cambio climático y las modificaciones introducidas por la actividad humana en los paisajes costeros, como los diques y el desarrollo urbano, limitan la capacidad de los ecosistemas costeros para adaptarse de forma natural y agravan la pérdida de servicios ecosistémicos costeros (*muy probable*, *confianza alta*). Se necesitan estrategias proactivas para evitar la degradación de la calidad de vida en las zonas costeras, ya que la combinación de la reducción de los servicios ecosistémicos y los daños al entorno construido por la exacerbación de los peligros costeros supone una carga cada vez mayor para las comunidades, las industrias y las culturas (*muy probable*, *confianza alta*).

En la costa, los paisajes naturales están entrelazados con las culturas, las economías y las infraestructuras construidas por los humanos (Figura 9.4). Los paisajes costeros (p. ej., playas, dunas, sistemas de barreras, humedales costeros y acantilados) evolucionan a lo largo de una variedad de escalas temporales (de minutos a milenios) en respuesta a forzamientos físicos (p. ej., mareas, olas, tormentas o variabilidad climática), así como a controles biológicos (p. ej., tipo y densidad de vegetación o características de los ecosistemas) y

geológicos (p. ej., flujos de sedimentos, tectónica o composición del sustrato)⁴⁶. El cambio climático está exacerbando los peligros costeros con el aumento del mar y tormentas más intensas, provocando un aumento tanto del riesgo de inundaciones como del cambio y la erosión del litoral (KM 9.1)^{47, 48, 49, 50}.

Las comunidades costeras se enfrentan a olas de calor, lluvias torrenciales, deslizamientos de tierra, inundaciones compuestas y otros riesgos climáticos que no son exclusivos de los entornos costeros¹⁴. La salud, la función y la productividad de los ecosistemas costeros también se están viendo degradadas por factores de estrés derivados de la acción humana (p. ej., urbanización, dragado, relleno de humedales o desvío de sedimentos). Estas amenazas combinadas ponen en peligro el apego al lugar⁵¹, la economía y la seguridad (Figura 9.5)^{52, 53}. Comprender las interacciones e interconexiones entre las amenazas (KM 9.1), las comunidades y los ecosistemas costeros es necesario para tomar medidas informadas de mitigación y adaptación al cambio climático (KM 9.3).

Condiciones existentes en una comunidad costera



Los paisajes costeros y las intervenciones de la actividad humana proporcionan protección económica, cultural y comunitaria frente a los riesgos climáticos existentes en las condiciones actuales.

Figura 9.4. Esta hipotética comunidad costera muestra algunos de los entornos naturales y construidos que se encuentran en las comunidades costeras reales de nuestra Nación. Esta comunidad tiene varios tipos de costas abiertas: 1) acantilados; 2) playas bajas; y 3) una isla barrera. Detrás de la isla barrera está 4) un estuario de marea bordeado de pantanos. Hay dos vecindarios residenciales, 5) un centro comercial; y 6) una zona industrial que depende del agua. La escollera en la base del acantilado y los espigones de la playa (estrechas estructuras perpendiculares que se extienden desde la playa hasta el océano) protegen de la erosión costera provocada por las olas. Las siguientes figuras de este capítulo ilustrarán los posibles impactos del cambio climático en esta comunidad (Figura 9.5) y las estrategias de adaptación para aumentar su resiliencia (Figura 9.6). Adaptado de Dupigny-Giroux *et al.* 2018⁵⁴.

Fresh groundwater aquifer

Aumento de los peligros en una comunidad costera

Se prevé que las comunidades costeras se inunden debido al aumento del nivel del mar y al aumento del nivel de las aguas subterráneas.

Figura 9.5. Los impactos climáticos futuros sobre nuestros paisajes y comunidades costeras serán variables. 1) El aumento del nivel del mar y la energía en aumento de las olas provocarán la erosión del litoral y el hundimiento de los acantilados costeros, lo que puede alterar paisajes emblemáticos y dañar lugares de valor, incluidos sitios históricos o culturales. 2) Se prevén riesgos de inundación y oleaje, incluidas 3) inundaciones debido al aumento de las capas freáticas, que amenazan viviendas y empresas, así como infraestructuras y servicios públicos. 4) Algunos ecosistemas pueden adaptarse o migrar para adaptarse al futuro nivel del mar, mientras que otros pueden quedar inundados y convertirse en aguas abiertas. Adaptado de Dupigny-Giroux *et al.* 2018⁵⁴.

Impacto en las comunidades y las personas

Las costas de nuestra Nación sustentan sectores sustanciales de nuestra economía, y sirven de entrada y salida de bienes y servicios (enfoque en riesgos de las cadenas de suministro), generan ingresos a través de la recreación y el turismo y apoyan negocios pesqueros prósperos y diversos y otras industrias basadas en el agua. Los condados costeros aportan \$11 billones anuales (en dólares de 2022) en bienes y servicios y emplean a 58.3 millones de personas⁸. El aumento de los impactos en los sistemas costeros debido a la exacerbación de los peligros se extenderá por todo los EE. UU.

A medida que las tormentas extremas se intensifican o los impactos se ven exacerbados por el SLR (KM 2.2, 3.5), los daños aumentan por miles de millones, con daños significativos centrados donde los ciclones tropicales (p. ej., huracanes) tocan tierra⁵⁵ y donde los ciclones extratropicales son la causa más común de los peligros costeros^{48, 56}. Las tormentas extremas y la mayor frecuencia de inundaciones por mareas altas (high tide flooding, HTF) conllevan impactos en cascada, como pérdida de accesibilidad y continuidad de la energía (KM 5.2); pérdida de servicios ecosistémicos (KM 8.1, 8.3); impactos en la agricultura por inundaciones e intrusión de agua salada en las aguas subterráneas (KM 30.1); inundaciones, erosión y deslizamientos

de tierra que perturban el transporte (KM 13.1), servicios públicos, infraestructuras, servicios de emergencia y teleconexiones (KM 12.2); y migración y desplazamiento de la población (KM 20.3).

Las evaluaciones de peligros costeros que tienen en cuenta el SLR, las marejadas ciclónicas, las olas, las precipitaciones y el cambio costero (p. ej., el cambio de playas y dunas y el cambio de acantilados) pueden describir mejor la posible respuesta costera futura y los impactos sociales^{37, 57, 58}. En comparación con la evaluación exclusiva de las inundaciones provocadas por el SLR, la inclusión de estos procesos amplía enormemente la región de la llanura de inundación en el norte del Golfo de México⁵⁸ y triplica el número estimado de personas expuestas a inundaciones en la costa del Pacífico³⁷.

Durante un evento extremo, más agua marina puede arrastrar las islas barrera y fluir hacia las bahías a través de las ensenadas, lo que aumenta el riesgo de inundación y amplifica la marejada ciclónica en las bahías costeras interiores en más de un 20 %^{59, 60, 61}. El crecimiento continuo de la población y la urbanización expondrá a un número cada vez mayor de personas al riesgo de inundaciones costeras^{3, 62, 63, 64}.

Aunque las tormentas extremas acaparan los titulares de los periódicos, el SLR conlleva retos crónicos que podrían ser igual o más perjudiciales a largo plazo². Investigaciones sobre las aguas subterráneas costeras en las Islas del Pacífico⁶⁵, atolones de baja altitud⁶⁶, acuíferos kársticos⁶⁷, sistemas de islas barrera⁶⁸ y márgenes tectónicos activos^{69,70} han demostrado que el aumento de las aguas subterráneas provocado por el clima impactará las comunidades y los ecosistemas costeros debido a la intrusión de agua salada en las fuentes de aguas subterráneas, suelos más saturados y estancamientos en la superficie comparables en magnitud a las inundaciones terrestres provocadas por el SLR. La intrusión de agua marina en los acuíferos costeros puede aumentar la salinidad por encima de los niveles potables, lo que pone en peligro el acceso al agua dulce de millones de personas⁷¹.

La combinación del aumento de las aguas subterráneas y las HTF en las comunidades costeras seguirá impactando las infraestructuras de aguas pluviales y residuales, incluidos los sistemas sépticos, y aumentará la incidencia de inundaciones urbanas^{72, 73, 74, 75, 76}. Esto podría causar problemas de salud pública, como vertidos contaminantes al medio ambiente⁷⁷ y la propagación de enfermedades infecciosas ambientales (KM 15.1). Además, los emplazamientos contaminados, como los del superfondo, se enfrentan a una exposición cada vez mayor al aumento de las aguas subterráneas y a los daños causados por las inundaciones, lo que podría provocar futuros problemas de salud pública y medioambientales si los contaminantes soterrados se movilizan y penetran en las aguas subterráneas o en los sistemas fluviales (KM 28.2). Las HTF y el aumento de las aguas subterráneas también aumentarán los casos de inundación de carreteras, lo que podría obstaculizar el tráfico, retrasar los esfuerzos de respuesta de emergencia, inundar propiedades e impactar negativamente el valor de los bienes inmuebles y el comercio^{78, 79, 80, 81, 82}. En las zonas agrícolas, el aumento de las aguas subterráneas y la intrusión de agua salada en los sistemas de riego están reduciendo la productividad de los cultivos, lo que ocasiona tierras de cultivo estériles en ausencia de cultivos que toleren la sal^{83, 84}.

Los impactos del empeoramiento de los peligros costeros no se distribuyen por igual entre las comunidades estadounidenses (KM 20.1; Recuadro 20.1)^{85, 86, 87}. Las disparidades en cuanto a riqueza, oportunidades económicas y educativas, calidad y cantidad de las infraestructuras e inversión en medidas de reducción del riesgo de inundación contribuyen a que los impactos físicos y socioeconómicos sobre los residentes costeros sean variables^{88, 89, 90}. Muchas comunidades tribales e indígenas se enfrentan a impactos severos de tormentas extremas, erosión, deshielo del permafrost y SLR, con recursos limitados para apoyar la adaptación (KM 16.1, 29.4, 29.7; Capítulo 30). Las políticas históricas de negación de servicios financieros obligaron a las comunidades de color a vivir en los terrenos menos valiosos, a menudo bajos, que presentan un mayor riesgo de inundaciones, una mayor exposición a sustancias tóxicas y más peligros agravados por el cambio climático que los vecindarios no afectados por dicha marginalización^{91, 92, 93}. Las comunidades económicamente desfavorecidas tienen un mayor riesgo estadístico de exposición a las inundaciones que

las comunidades más ricas^{86, 87, 88}. Esta desigualdad aumenta aún más porque el impacto de las inundaciones costeras en las personas y las comunidades no solo se basa en los daños causados por las inundaciones, sino también en la capacidad de pagar los costos de recuperación⁸⁵. Décadas de limitada inclusión de la comunidad en la toma de decisiones y desinversión en infraestructuras críticas y servicios comunitarios han generado un mayor riesgo a los impactos físicos y socioeconómicos de los peligros costeros⁹⁴.

Además de los impactos directos de los eventos agudos, los impactos crónicos también se experimentan de forma desigual entre los residentes costeros. Los cambios en los servicios ecosistémicos, como los hábitats de la pesca comercial, impactarán las prácticas indígenas en las que la cultura y la biodiversidad están inextricablemente unidas. En las islas hawaianas, loko ina (estanques piscícolas hawaianos) son formas de acuicultura de baja intensidad que tradicionalmente proporcionaban seguridad alimentaria y contribuían a la resiliencia de las comunidades costeras (KM 30.1, 30.5)^{95, 96}. Estos sistemas se ven amenazados por el SLR, con consecuencias sobre los medios subsistencia y las prácticas culturales locales. Otras comunidades, como los pescadores de subsistencia y los pueblos rurales basados en los negocios pesqueros, sufrirán de forma similar, ya que los impactos negativos sobre el hábitat de la pesca costera amenazan su modo de vida (KM 10.1, 10.2).

El aumento constante de los precios de los seguros contra inundaciones reduce la asequibilidad de las viviendas en las regiones costeras, y muchos herederos y propietarios con ingresos bajos y moderados no pueden pagar un seguro contra inundaciones (KM 16.1, 21.5)^{97, 98}. Aparte de la asequibilidad de la vivienda, efectos en cascada como la gentrificación climática —cuando residentes acomodados se trasladan a zonas de bajos ingresos menos expuestas a riesgos climáticos, desplazando a los residentes anteriores^{99, 100, 101}— y la falta de mano de obra seguirán impactando la cultura, la diversidad y la productividad económica de las zonas costeras^{99, 102, 103, 104}.

La resiliencia natural de la costa está cambiando

Durante siglos, los seres humanos han ido remodelando la costa para satisfacer las necesidades de la sociedad mediante el desarrollo urbano, la retención y desviación de sedimentos y las estructuras de defensa costera 105, 106, 107. Estas intervenciones han conducido a muchos sistemas costeros peligrosamente cerca de un cambio irreversible y profundo (KM 8.1) 108, 109. Las pérdidas de ecosistemas debido a la erosión, las inundaciones más frecuentes y la compresión costera (donde el desarrollo humano o el cambio natural de elevación limita o impide la migración hacia el interior de los hábitats costeros) limitarán cada vez más la capacidad de los paisajes costeros para adaptarse de forma natural y disminuirán su capacidad para proporcionar valiosos servicios ecosistémicos (Figura 9.5; KM 8.1) 47, 110, 111, 112, 113.

Los manglares y los pantanos de agua salada, denominados colectivamente humedales de marea, proporcionan un hábitat cultural y económicamente esencial para la pesca comercial y absorben y almacenan el agua de las inundaciones (enfoque en el carbono azul)^{114, 115}. El SLR y el aumento de los peligros costeros (KM 9.1), así como la eutrofización, la disponibilidad de sedimentos, el drenaje deficiente y la compresión costera pueden provocar la pérdida de humedales de marea^{116, 117}. Algunos humedales de marea pueden sobrevivir en el lugar debido a la acreción, mientras que otros pueden migrar hacia tierras altas y convertir otros ecosistemas (p. ej., hábitat de tierras altas, agricultura y bosques) en humedales de marea^{118, 119}.

En todo Estados Unidos se prevé una pérdida neta de humedales de marea, pero el ritmo y el alcance de la pérdida variarán significativamente según la geografía y el escenario de cambio climático¹²⁰. Por ejemplo, en la bahía de Chesapeake, ¹²¹ Florida, ¹²² y Nueva Jersey¹¹⁷ se prevé una pérdida neta de humedales de marea. A lo largo de la Costa del Golfo, los manglares están superando a los pantanos de agua salada, lo que refleja un cambio en la dinámica de la vegetación y el hábitat¹²³. El desarrollo costero y la topografía escarpada limitan la migración hacia el interior a lo largo de la costa del Pacífico, y la conversión de los humedales de marea en aguas abiertas y la pérdida neta de humedales de marea debido al SLR parecen inevitables¹²⁴.

Las islas barreras y los sistemas de arrecifes actúan como primera línea de defensa contra las inundaciones: absorben los impactos de las olas cuando las grandes tormentas tocan tierra, lo que reduce el riesgo de inundaciones de las comunidades costeras y del interior^{125, 126, 127, 128, 129}. Los sistemas de playas de las islas barrera y de tierra firme pueden migrar hacia tierra de forma natural para seguir el ritmo del SLR, o pueden verse superados y estrecharse o aplanarse en función de su elevación, la frecuencia con la que las olas de las tormentas los bañan, el suministro de sedimentos y la persistencia de la vegetación, todo lo cual puede verse afectado por las modificaciones humanas^{61, 130, 131, 132, 133, 134, 135}.

Las observaciones a largo plazo, las proyecciones de cambio costero y erosión y la mejor comprensión de los complejos procesos de retroalimentación costeros ayudan a definir las condiciones y los puntos de inflexión que pueden limitar la adaptación natural (KM 8.1)^{136, 137}. La adaptación climática que restaura los procesos naturales y trabaja con los ecosistemas y paisajes costeros puede reducir los riesgos de inundación y proporcionar múltiples beneficios colaterales, como el secuestro de carbono (KM 8.1; enfoque en el carbono azul). Por ejemplo, las zonas de espacio abierto adquiridas o restauradas (p. ej., terrenos no urbanizados, agrícolas o parques) a lo largo de la costa pueden proporcionar espacio de alojamiento para la migración de los humedales continentales y los hábitats costeros a medida que sube el nivel del mar^{138, 139}.

Permitir que los ecosistemas costeros evolucionen de forma natural puede tener un impacto negativo en algunas comunidades y especies de la vida silvestre, como la remodelación de las islas barrera en respuesta a eventos extremos que pueden aumentar las marejadas ciclónicas tierra adentro (KM 9.1); sin embargo, estos cambios naturales pueden tener impactos beneficiosos para otras especies y comunidades a través de la creación de hábitats y la mejora de la calidad del agua^{50, 134}. Todos los cambios en el paisaje repercuten en la biodiversidad a través de la disminución de las especies, los cambios fenológicos y de área de distribución de las especies, las enfermedades y los impactos de las especies invasoras (KM 8.2), que afectan praderas marinas, corales, manglares, pesquerías, aves playeras y mamíferos marinos (KM 21.2, 22.1, 23.2, 26.3, 27.3, 28.2, 30.4).

Mensaje clave 9.3

La adaptación reduce el riesgo y aporta beneficios adicionales a las comunidades costeras

La aceleración del aumento del nivel del mar y el cambio climático transformarán el paisaje costero, lo que exigirá un nuevo paradigma sobre cómo convivimos con estos cambios o nos adaptamos a ellos (confianza alta). Aunque de carácter gradual, las soluciones basadas en la naturaleza y las estrategias de reubicación planificada pueden ayudar a las comunidades a adaptarse a los crecientes peligros costeros si están dirigidas por la comunidad y centradas en la equidad (confianza media). Mantener las conexiones culturales y económicas dentro de las comunidades costeras requerirá una adaptación transformadora equitativa que aborde las interconexiones sistémicas entre ecosistemas, comunidades y gobernanza (confianza media).

A pesar de los impactos proyectados del cambio climático, las comunidades costeras siguen siendo lugares valiosos para vivir y trabajar. El incesante crecimiento de la costa y el entusiasmo por ella crean una tensión entre la necesidad de adaptarse al cambio climático y nuestras relaciones actuales con el litoral^{14, 140}. Aunque la adaptación se está produciendo en algunos lugares, las adaptaciones a pequeña escala y progresivas no son suficientes para el ritmo y la escala de los cambios que ya se están produciendo (KM 9.2, 31.1)^{13, 14, 15}. La aceleración del SLR y el aumento de los peligros costeros (KM 9.1) están afectando zonas geográficas más

extensas a lo largo de la costa, lo que amplía la escala y la complejidad de las respuestas de adaptación y el número y la diversidad de las partes interesadas en situación de riesgo¹³

Una adaptación que incluya un amplio conjunto de estrategias que aborden las causas profundas de la vulnerabilidad costera, tengan en cuenta las necesidades de las diversas partes interesadas, se centren en la equidad (KM 31.2) y replanteen valores y supuestos sociales puede conducir a un cambio transformador y sistémico que permita a las comunidades costeras prosperar y mantener una relación con la costa (KM 22.1, 31.3)¹⁴¹. Algunos ejemplos de estrategias pueden ser actualización de las políticas de uso de la tierra^{142, 143}, inversiones en infraestructuras comunitarias, soluciones basadas en la naturaleza (nature-based solutions, NBS) y reubicaciones planificadas^{14, 144}. Por separado, estas estrategias son pasos graduales, pero cuando se combinan de manera que se tengan en cuenta las metas comunitarias a largo plazo y el compromiso inclusivo y sostenido con las comunidades de primera línea, pueden conducir a una adaptación transformadora equitativa (Figuras 9.6, 22.6, 31.3; Recuadro 9.1; KM 31.2, 31.3)^{14, 145}.

La adaptación transformadora requiere cambios fundamentales en sistemas, valores y prácticas para abordar equitativamente los riesgos del cambio climático (KM 31.3), incluida la integración de las perspectivas locales, lo que conduce a una distribución más equitativa de los recursos⁹. Las acciones de adaptación dirigidas por la comunidad y las NBS también pueden mejorar el sentido del lugar al recrear relaciones perdidas con la costa o fomentar otras nuevas entre las personas y el medio ambiente¹⁴.

Estrategias de adaptación para una comunidad costera



La implementación oportuna de estrategias de adaptación, incluida la reubicación planificada, puede reducir los impactos del cambio climático en las comunidades costeras.

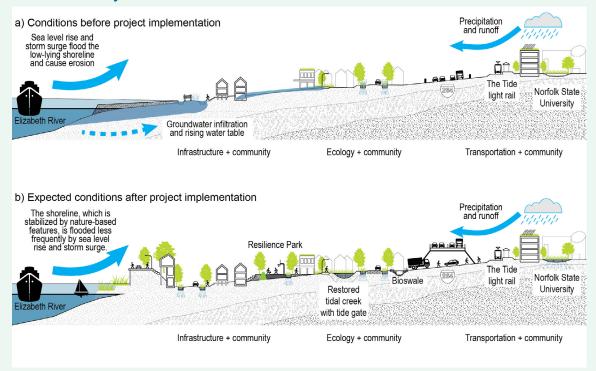
Figura 9.6. Muchas estrategias pueden reducir los riesgos costeros provocados por el clima. 1) Las infraestructuras críticas, las viviendas y las empresas pueden reubicarse fuera de peligro. Las tierras retiradas crean espacio para parques y zonas recreativas, soluciones basadas en la naturaleza (nature-based solutations, NBS) para la reducción del riesgo de inundaciones o espacio de migración para los ecosistemas costeros, al tiempo que dan cabida al aumento de las aguas. 2) Las comunidades reubicadas pueden trasladarse a comunidades ya establecidas; o 3) pueden crear nuevos centros residenciales. La participación intencionada y equitativa de las partes interesadas contribuye a garantizar que las desigualdades históricas no se perpetúen durante las reubicaciones. 4) Las NBS, como la restauración de humedales, pueden frenar y almacenar las aguas crecientes. 5) Las viviendas y estructuras pueden reubicarse lejos de las capas freáticas en ascenso. 6) Pueden ser necesarias combinaciones de infraestructuras verdes y grises (estrategias híbridas); por ejemplo, un malecón viviente proporciona protección al litoral y un hábitat beneficioso para los organismos marinos. 7) Los bienes culturales que definen el carácter de una comunidad, como este faro, pueden elevarse o trasladarse. Adaptado de Dupigny-Giroux *et al.* 2018⁵⁴.

Recuadro 9.1. De camino a la adaptación: Norfolk, Virginia

Norfolk, Virginia, con 245,000 habitantes y el mayor complejo naval del mundo, se encuentra en la desembocadura de los ríos James y Elizabeth y la Bahía de Chesapeake. La tasa de aumento del nivel del mar es actualmente de 0.2 pulgadas (4.7 mm) al año y se está acelerando. En la actualidad, las inundaciones por mareas altas (high tide flooding, HTF) se producen entre 10 y 15 veces al año y para 2050 podrían producirse entre 85 y 125 veces al año en promedio^{2,146}. Se están construyendo proyectos de resiliencia a gran escala que incorporan soluciones basadas en la naturaleza (nature-based solutions, NBS) como resultado de estrategias dirigidas por los ciudadanos que informaron el uso de la tierra, las normativas y las inversiones de la ciudad¹⁴⁷.

El proyecto de la cuenca de Ohio Creek, financiado con una subvención de \$112 millones del Concurso Nacional de Resiliencia ante Desastres, aborda las HTF, las inundaciones provocadas por tormentas y la erosión del litoral que causaron el aislamiento y la fragmentación de la comunidad (Figura 9.7). Los vecindarios están habitados predominantemente por personas de raza negra e incluyen una urbanización de viviendas sociales y cientos de casas inscritas en el Registro Histórico Nacional. Un amplio proceso de participación comunitaria garantizó que se escuchara a los residentes de los vecindarios impactados y que se abordaran los retos sociales. La pieza central del proyecto es el parque de la resiliencia, que incluye un arroyo de marea restaurado y una berma contra inundaciones, humedales y NBS. Los vecindarios circundantes dispondrán de carreteras accesibles durante las HTF y ganarán espacios de reunión comunitarios y lugares de trabajo y juego.

Estado actual y futuro de la cuenca de Ohio Creek



Las estrategias que tienen en cuenta las metas comunitarias a largo plazo y el compromiso inclusivo y sostenido con las comunidades de primera línea pueden conducir a una adaptación transformadora equitativa.

Figura 9.7. Al centrarse en el concepto de comunidad, los vecindarios recibirán protección costera para abordar el aumento del nivel del mar y el aumento de las marejadas ciclónicas, infraestructuras actualizadas para abordar el aumento de las aguas subterráneas y el aumento de las precipitaciones y la escorrentía, un gran espacio de reunión conocido como parque de resiliencia y transporte accesible para personas y vehículos. Este ejemplo de adaptación transformadora incluye proyectos de ingeniería tradicionales y soluciones basadas en la naturaleza. Adaptado con permiso de Waggonner & Ball ©2022¹⁴⁸.

Soluciones basadas en la naturaleza paral as comunidades costeras

Las NBS integran los procesos naturales con los enfoques tradicionales de ingeniería para reducir el riesgo de inundaciones, al tiempo que preservan o mejoran el valor ecológico de los paisajes naturales (p. ej., mantener el hábitat esencial para las especies protegidas) y proporcionan posibles beneficios sociales, económicos y otros beneficios colaterales (enfoque en el carbono azul)^{149, 150}. Las NBS pueden incluir la conservación de los ecosistemas y la restauración o recreación de los procesos naturales que reducen los riesgos de inundación, soluciones híbridas (p. ej., costas vivas) y la ecologización de las infraestructuras tradicionales (p. ej., escollera ecológica)^{151, 152}. Aunque las NBS son efectivas para reducir las inundaciones temporales provocadas por las tormentas, es posible que solo aporten beneficios modestos en la prevención de las inundaciones permanentes provocadas por el SLR^{149, 153}. Sin embargo, cuando las NBS se combinan con una reubicación planificada, se proporciona protección contra las inundaciones y el SLR al alejar a una comunidad del peligro, al tiempo que se restablecen los beneficios naturales de los ecosistemas costeros para la reducción del riesgo de inundaciones⁵².

Los manglares y otros humedales costeros reducen la energía de las olas ^{154, 155}, disminuyen la erosión costera ^{156, 157} y atenúan las inundaciones ^{114, 158, 159}. Los humedales ayudaron a las comunidades a evitar \$795.2 millones (en dólares de 2022) en daños directos por inundaciones durante el huracán Sandy ¹²⁷. Las playas y las dunas reducen las marejadas ciclónicas y absorben la energía de las olas ¹⁶⁰. Los arrecifes de coral amortiguan la energía de las olas y protegen de las inundaciones a las comunidades adyacentes, con un beneficio estimado de reducción del riesgo de inundaciones de más de \$2,200 millones anuales (en dólares de 2022) en los EE. UU. contiguos ^{161, 162} y más de \$1,100 millones anuales (en dólares de 2022) en Hawaii, Guam, Samoa Americana, la Mancomunidad de las Islas Marianas del Norte, Florida, Puerto Rico y las Islas Vírgenes de los EE. UU. ¹⁶³.

Las soluciones híbridas pueden reducir la erosión costera^{164, 165} y mejorar la vida útil y la reducción del riesgo de inundación de las infraestructuras tradicionales¹⁶⁶. Se ha demostrado que las soluciones híbridas reducen el riesgo de inundación en distintas condiciones hidrodinámicas¹⁶⁵. Continuamente se están publicando documentos de orientación de las NBS^{149, 167, 168, 169}, y la implementación de las estrategias de NBS va en aumento. La capacidad de incluir elementos adaptativos en las NBS para futuras condiciones cambiantes^{144,170,171} las convierte en un componente importante del panorama de la adaptación en las próximas décadas.

Estrategias de reubicación planificada en comunidades costeras

La reubicación planificada es el proceso de trasladar propiedades individuales, infraestructuras o comunidades enteras de forma preventiva lejos de, o en respuesta a, los impactos de los peligros naturales¹⁷². Históricamente, la mayoría de las comunidades han permanecido en su lugar después del desastre adaptándose o reconstruyendo mediante soluciones de ingeniería (KM 20.3)¹⁷³. Sin embargo, a medida que aumenten los impactos del cambio climático, será más difícil adaptarse y reconstruir en el lugar (KM 31.1). Con la aceleración del SLR, especialmente en escenarios de SLR de baja probabilidad y alto impacto (Figura 9.1), la reubicación planificada puede tener una mejor relación costo-efectividad que la adaptación en el sitio, con un menor riesgo a largo plazo de pérdida de vidas y propiedades si fallan las soluciones de ingeniería¹⁷⁴.

En los EE. UU., la reubicación planificada suele producirse de forma reactiva (es decir, después de un desastre) y no proactiva (es decir, reubicar las comunidades en riesgo antes de un desastre). Por ejemplo, después del huracán Sandy en Staten Island, Nueva York, se llevaron a cabo adquisiciones selectivas de los activos con mayor riesgo de sufrir daños repetitivos en el futuro¹⁷⁵. Los residentes y las comunidades también se han reubicado después de desastres naturales, como en Isle de Jean Charles (Louisiana)¹⁷⁶; Kivalina, Alaska;¹⁷⁷; y la nación india quinault (Recuadro 20.1). A medida que se amplía la reubicación

planificada, existe una necesidad urgente de evaluar las lecciones aprendidas de reubicaciones anteriores e inclinarse por una adaptación transformadora que mejore el bienestar de la comunidad y aborde la justicia social, ecológica e intergeneracional^{178, 179}.

La reubicación proactiva planificada puede convertirse en la respuesta más viable para muchas comunidades costeras futuras a medida que continúe el SLR y las tierras costeras queden sumergidas^{38,180}. Sin embargo, los debates sobre la reubicación planificada siguen siendo difíciles y controvertidos^{12,174}. Entre los impedimentos se incluye la resistencia al cambio¹⁸¹; desacuerdos sobre el momento en que las comunidades y las infraestructuras pueden perderse irrevocablemente y, por lo tanto, el momento adecuado para la reubicación; falta de toma de decisiones dirigida por la comunidad; costo-efectividad en comparación con la defensa en el lugar^{174,182}; trastornos en la cohesión y el capital social de la comunidad^{183,184}; e identificación de lugares de sustitución adecuados¹⁸⁵.

Oportunidades de adaptación transformadora en las comunidades costeras

Una adaptación transformadora que sea proactiva e intencionada y que involucre cambios fundamentales en los sistemas, valores y prácticas (KM 31.3) ofrece oportunidades para hacer frente a los retos de las costas cambiantes y en retroceso. La adaptación transformadora a lo largo de la costa tiene en cuenta aspectos como el financiamiento y la seguridad económica, la alineación de las entidades gubernamentales, el apego al lugar y a los medios de subsistencia y los conocimientos técnicos^{52,53}.

La adaptación transformadora intencionada y equitativa es una oportunidad para corregir las causas profundas de las desigualdades y los impactos dispares del cambio climático en las comunidades costeras^{14, 15}. Para lograrlo se necesitaría un financiamiento sostenido dedicado a la planificación, el diseño y la ejecución proactivos¹⁸⁶. Esto evitaría las estrategias reactivas que históricamente han exacerbado las desigualdades y centrado los recursos en las comunidades ricas, típicamente blancas (KM 20.3)¹⁸⁷; un desafío particular en áreas donde existen grandes disparidades de riqueza y donde propietarios e inquilinos de bajos ingresos carecen de seguros de inundación asequibles¹⁰³.

Las actuales estrategias de adaptación que se están implementado cada vez más en la costa podrían cambiar hacia una adaptación transformadora si se centra la atención en las comunidades locales y se abordan de forma transparente las desigualdades (KM 31.2, 31.3; Figura 31.2). Esto requerirá un cambio gradual en la práctica, que ocasionará cambios adicionales en los sistemas (p. ej., concesión de permisos), los valores (p. ej., reconocer y abordar injusticias del pasado) y la tolerancia al riesgo (p. ej., aumentar la comodidad en la protección natural de la costa frente a las estructuras reforzadas más tradicionales).

Cuentas trazables

Descripción del proceso

Esta evaluación se basa en los mensajes clave del capítulo "Efectos costeros" de la Cuarta Evaluación Nacional del Clima, y los amplía, ya que esos mensajes clave siguen siendo pertinentes, aunque se han vuelto aún más urgentes¹⁸⁸. El informe del Grupo de Trabajo Interinstitucional sobre el Aumento del Nivel del Mar de Estados Unidos (en lo sucesivo, "Grupo de Trabajo")² proporciona evidencia clara de que el aumento del nivel del mar (sea level rise, SLR) ya se está acelerando y que las tendencias actuales siguen la curva intermedia-baja o superior a lo largo de las costas de la Nación.

Los impactos asociados al SLR y a las tormentas costeras extremas están aumentando según las observaciones, los ecosistemas y las comunidades costeras se enfrentan a riesgos cada vez mayores, y la adaptación transformadora basada en soluciones basadas en la naturaleza puede proporcionar nuestra mejor esperanza para mantener un sentido de equilibrio entre las costas y nuestras comunidades costeras. El equipo de autores requería una amplia y profunda experiencia en las costas del Atlántico, del Golfo y del Pacífico, así como en las costas de Hawaii y las Islas del Pacífico afiliadas a los EE. UU., el Caribe estadounidense y Alaska; la vanguardia de la ciencia del SLR; los procesos físicos que dan forma a nuestras costas; las desigualdades sistémicas que siguen poniendo en mayor riesgo a las comunidades de primera línea; y las acciones humanas que han alterado las costas y transformado el litoral para adaptarlo a los deseos de la sociedad.

Los posibles autores fueron propuestos por sus respectivas agencias, universidades, organizaciones o expertos. El líder del capítulo y los autores principales de la coordinación federal analizaron y examinaron posibles autores con la meta de crear un equipo cohesionado y comprometido a aunar su formidable experiencia y conocimientos para desarrollar este capítulo.

Este capítulo se elaboró mediante teleconferencias semanales, intercambios de correos electrónicos, debates técnicos de la base de evidencia pertinente y deliberaciones de expertos por parte de los autores. El equipo de autores, junto con el Programa de Investigación sobre el Cambio Global de Estados Unidos, organizó un taller de compromiso público con participantes de agencias federales, estatales y locales; consultores y miembros interesados del público. El taller utilizó enfoques innovadores y grupos de trabajo que exploraron lo que más les gustaba a los participantes acerca de la costa antes de profundizar en los temas clave que enmarcaron este capítulo y el desarrollo de los mensajes clave.

La necesidad urgente de adaptación, con énfasis en las soluciones basadas en la naturaleza y la reubicación planificada, fue un claro impulsor de los mensajes clave 9.2 y 9.3. Se necesita más literatura que presente las lecciones aprendidas y las implementaciones exitosas, aunque sea a pequeña escala, para lograr la escala de reubicación planificada que se espera que sea necesaria en los EE. UU. durante el próximo siglo¹⁷⁹. Los autores revisaron exhaustivamente la literatura sobre adaptación transformadora y adaptación centrada en la equidad y los valores comunitarios. y que incluyera una participación sólida de la comunidad. El concepto de adaptación transformadora y reubicación planificada requirió un diálogo a lo largo de muchos capítulos, haciendo énfasis en el Capítulo 20 (Sistemas sociales y justicia) y en el Capítulo 31 (Adaptación) para lograr coherencia y retratar un sentido de urgencia para la Nación a lo largo de estos caminos.

El consenso sobre los mensajes clave y la literatura de apoyo requirió múltiples iteraciones, discusiones con otros capítulos y una cuidadosa revisión en respuesta a los comentarios del público y de las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina.

Mensaje clave 9.1

Aumentan los riesgos costeros debido a la aceleración del aumento del nivel del mar y al cambio de los patrones de las tormentas

Descripción de la base de evidencia

Múltiples líneas de evidencia, lo que incluye observaciones por satélite y mareógrafos y simulaciones de modelos, muestran que hasta la fecha se ha producido un SLR sustancial, a nivel global y en los EE. UU., como se documenta y sintetiza en la contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (AR6) y el informe del Grupo de Trabajo sobre SLR^{2, 189}. Las observaciones muestran que el SLR se está acelerando a nivel global, nacional, regional y local, y las proyecciones del AR6 y los escenarios del nivel del mar del informe del Grupo de Trabajo sugieren que se espera que estas tendencias continúen durante las próximas décadas y hasta finales de este siglo y posteriormente (consulte https://sealevel.nasa.gov/data_tools/18)^{2, 189}. Más allá de 2150, se espera que el SLR continúe durante los próximos miles de años debido a los efectos a largo plazo de las emisiones y el calentamiento del siglo pasado, independientemente de las futuras emisiones que se produzcan después de 2100. Estas líneas de evidencia se sintetizan y se documenta un gran compendio de literatura relevante (p. ej., Dangendorf et al. 2019¹⁹⁰, Frederikse et al. 2020¹⁹¹; Fox-Kemper et al. 2021²⁰²; Hamlington et al. 2021¹⁹²²; Edwards et al. 2021¹⁹³³) en el informe del Grupo de Trabajo sobre SLR² y en el AR6 del IPCC¹⁸⁹.

Un compendio adicional de literatura y referencias sobre lo mismo relaciona este aumento promedio del nivel del mar con una amplia gama de riesgos e impactos adversos en las zonas costeras. Los niveles extremos de agua seguirán subiendo con el SLR, lo que provocará inundaciones más profundas, frecuentes, severas y generalizadas (p. ej., Sweet et al. 2021³5, 2022²; Taherkhani et al. 2020¹9⁴; Thompson et al. 2021³6; Vitousek et al. 2017⁴¹). La evidencia observacional y de simulación de modelos también indica que muchos tipos de eventos extremos están aumentando en intensidad, frecuencia y extensión geográfica como consecuencia del cambio climático provocado por la actividad humana y que los huracanes, en particular, se están intensificando y provocando precipitaciones más intensas y marejadas ciclónicas más altas, todo lo cual agrava estos riesgos de inundación (consulte la base de evidencia subyacente a los mensajes clave 2.2 y 3.6 y el Programa Estadounidense de Investigación sobre el Cambio Global [US Global Change Research Program, USGCRP] 2017¹9⁵). Los niveles de agua extremos y las inundaciones provocan, a su vez, impactos adicionales en las zonas costeras (p. ej., erosión, daños a propiedades e infraestructuras e impactos en los ecosistemas). También se proyecta que las inundaciones compuestas asociadas a otros tipos de tormentas costeras (p. ej., ríos atmosféricos y ciclones extratropicales) aumenten con el calentamiento climático¹96, 197, 198.

Otra cantidad de literatura documenta cómo el crecimiento de la población, la migración y las tendencias de desarrollo en las zonas costeras han exacerbado los riesgos sociales y la exposición de las poblaciones y el entorno construido al aumento de los peligros relacionados con el SLR y las inundaciones^{199, 200, 201}.

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

En el caso de los impactos a corto plazo (hasta 2050), las incertidumbres y las brechas en la investigación incluyen el impacto de la variabilidad climática natural en las trayectorias basadas en la observación, la adaptación costera y las acciones políticas para reducir los riesgos futuros y mejorar la incorporación de los factores que interactúan y se combinan en las proyecciones de los niveles de agua costera y los riesgos de inundaciones costeras en general, como vientos, marejadas, olas, aumento de las capas freáticas y precipitaciones extremas. Además, se necesita una comprensión más detallada de los riesgos de inundaciones compuestas y datos al respecto para comprender y comunicar mejor los riesgos de inundación y fundamentar los esfuerzos de adaptación.

En el caso de los impactos a más largo plazo (después de 2050), las principales incertidumbres y brechas en la investigación incluyen la mejora de las capacidades de modelación y observación para evaluar las trayectorias del SLR promedio global a largo plazo en función de las incertidumbres tanto en las trayectorias de emisiones como en la sensibilidad de los procesos dinámicos de la capa de hielo a un nivel dado de calentamiento, en particular los procesos de la capa de hielo de "confianza baja", según el AR6 del IPCC²⁰. Las proyecciones que incluyen estos procesos de los mantos de hielo, sobre todo en los futuros de emisiones más altas, traen como consecuencia valores promedio de SLR globales sustancialmente más elevados para finales de este siglo y más allá. Las vías para llegar a estos futuros incluyen resultados como desintegración de la plataforma de hielo en la Antártida antes de lo proyectado; aparición abrupta y generalizada de la inestabilidad de la capa de hielo marino o la inestabilidad de los acantilados de hielo marino en la Antártida; y cambios más rápidos de lo proyectado en el equilibrio de la masa superficial en Groenlandia, potencialmente asociados a cambios en la circulación atmosférica, procesos de nubosidad o cambios en el albedo². Monitorear las fuentes del SLR en curso y los procesos que impulsan los cambios en el nivel del mar es fundamental para evaluar la divergencia de escenarios y rastrear la trayectoria observada del SLR, particularmente durante el período en que las trayectorias de emisiones futuras podrían aumentar el riesgo de desencadenar estos procesos de confianza baja.

Descripción de confianza y probabilidad

Con base en un promedio ponderado espacialmente de unos 100 mareógrafos de la NOAA y siguiendo las metodologías de Sweet et al. (2022)², existe una confianza alta en que el nivel del mar a lo largo de los EE. UU. contiguos ha subido unas 11 pulgadas (rango probable entre 10 y 12 pulgadas) de promedio durante el período 1920-2020, de las cuales unas 5-6 pulgadas se produjeron a partir de 1990, lo que indica que el aumento del nivel del mar se está acelerando. También existe una confianza alta en que la probabilidad de inundaciones costeras leves, moderadas y graves aumentó entre 2 y 3 veces entre 1990 y 2020 (según los umbrales de impacto meteorológico actuales de la NOAA calibrados con las alturas históricas del nivel del agua de los mareógrafos de la NOAA). Por lo tanto, es muy probable que la severidad y los riesgos de los peligros estén aumentando.

Existe una confianza alta y es probable que el nivel del mar suba unas 11 pulgadas (rango probable entre 9 y 13 pulgadas) entre 2020 y 2050, con base tanto en la extrapolación de las tasas y aceleraciones estimadas a partir de las observaciones históricas de los mareógrafos como en las proyecciones de los modelos, ya que ambos enfoques producen proyecciones dentro de rangos similares. En respuesta a 11 pulgadas de SLR para 2050, existe una confianza alta y es muy probable que la posibilidad de inundaciones costeras leves, moderadas y graves se produzca entre 5 y 10 veces más a menudo en 2050 en muchas regiones sin medidas adicionales de reducción del riesgo de inundación, en comparación con las normas contemporáneas.

Mensaje clave 9.2.

Los impactos costeros sobre las personas y los ecosistemas aumentan debido al cambio climático

Descripción de la base de evidencia

Un compendio creciente de literatura recoge la limitada capacidad de los ecosistemas costeros para adaptarse a los cambios provocados por el clima, en particular debido a la modificación humana. Múltiples líneas de evidencia muestran que se están produciendo cambios físicos en la zona costera en respuesta al cambio climático, lo que incluye conversión de las tierras altas y expansión de los pantanos^{121, 122, 202}, expansión de los sistemas de manglares¹²³ y pérdida de pantanos y playas debido a la erosión y a las barreras

que limitan la migración hacia el interior de estos ecosistemas^{47, 50, 110, 119, 138, 203}. La consiguiente pérdida de servicios ecosistémicos, como la protección frente a tormentas, el secuestro de carbono en los humedales, el hábitat sensible y la industria, lo que incluye la agricultura, el turismo, la recreación y la pesca, ha sido bien documentada (p. ej., Siverd *et al.* 2020²⁰⁴; Weiskopf *et al.* 2020²⁰⁵), y la amplificación de estas pérdidas a través de las modificaciones humanas de la costa están bien respaldadas en la literatura revisada por expertos^{105, 113, 206}.

Con la pérdida de ecosistemas, la exacerbación de los peligros costeros y el aumento de la población costera, se han observado daños y costos cada vez mayores (p. ej., Bouwer 2019²⁰⁷; Hino et al. 2019⁷⁹; Smiley et al. 2022²⁰⁸; Al-Attabi et al. 2023²⁰⁹), y se han documentado preocupaciones constantes en materia de salud y seguridad debido al aumento de la frecuencia de las inundaciones, a la contaminación de los suministros de agua, a la degradación de la calidad del agua, a la exposición a sustancias tóxicas y a las tensiones en la salud mental debido a la amenaza constante de desastres (p. ej., Coutu 2018²¹⁰; Makwana 2019²¹¹; Erickson et al. 2019²¹²; Gobler 2020²¹³; Raker 2022²¹⁴). Además, muchos estudios han demostrado que 1) las poblaciones sobrecargadas, con escasos recursos, económicamente desfavorecidas o vulnerables por otros motivos (p. ej., niños y personas con discapacidades) se enfrentan a una mayor carga a causa de los desastres (p. ej., Conzelmann et al. 2022²¹⁵; Raker 2022²¹⁴; Smiley et al. 2022²⁰⁸) y están limitados en su capacidad para recuperarse de estos impactos; y 2) las desigualdades existentes siguen magnificándose (p. ej., Erman et al. 2020²¹⁶; Griego et al. 2020²¹⁷; Sou et al. 2021²¹⁸; Dundon y Camp 2021²¹⁹; Bento y Elliott 2022²²⁰). Los funcionarios costeros municipales, los cargos electos y el personal documentan continuamente los crecientes retos que se plantean en sus comunidades a través de la participación en organizaciones profesionales (p. ej., la Liga Nacional de Ciudades, la Asociación de Gestores Estatales de Zonas Inundables y comunidades regionales de práctica). Los retos específicos incluyen la combinación del aumento del desarrollo y las presiones sobre el uso de la tierra y la exacerbación de los peligros costeros que ponen en riesgo a más hogares, empresas y personas. Numerosos municipios están instalando sistemas antirretorno, documentando las inundaciones provocadas por las mareas altas e intentando gestionar los impactos amplificados de las precipitaciones que se producen al mismo tiempo que las inundaciones provocadas por las mareas altas y otros peligros costeros (p. ej., EcoSystems 2014²²¹; WSAV 2018²²²; Coutu 2021²²³).

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

El futuro cambio del paisaje costero es difícil de modelar y predecir en líneas generales de la forma espacialmente detallada que requieren los responsables de la toma de decisiones, debido a la multitud y complejidad de los procesos y retroalimentaciones que actúan dentro de los distintos ecosistemas costeros y entre ellos^{137, 224, 225}.

Están surgiendo iniciativas a escala nacional para evaluar el riesgo de pérdida de hábitats vitales de humedales costeros^{112, 226} y controlar el estado diario y anual de las playas de arena mediante imágenes por satélite^{227, 228, 229}. Sin embargo, el seguimiento por sí solo no puede salvar estos ecosistemas en riesgo; es necesario mejorar la comprensión y la capacidad de modelar los umbrales o los puntos de inflexión asociados a la pérdida de ecosistemas frente a su supervivencia para apoyar la planificación proactiva de la gestión de los recursos y las comunidades costeras^{58, 137}. Se necesita información sobre cuándo y dónde puede producirse la intrusión de agua salada y sus impactos^{69, 230, 231}.

La previsión y contabilización de futuras modificaciones humanas que puedan remodelar la costa o afectar los comportamientos de los ecosistemas son áreas de incertidumbre considerable²³². El desarrollo de escenarios multidisciplinares puede ayudar a explorar los cambios físicos que pueden producirse, el modo en que los seres humanos pueden decidir responder a estos cambios y los recursos que pueden estar

disponibles para apoyar estas modificaciones, como colocación o eliminación de infraestructuras grises y verdes, reubicación planificada o concesiones mutuas^{233, 234}. Una mejor comprensión de cuándo y de qué forma pueden actuar los seres humanos en el futuro puede, a su vez, ayudar a comprender la respuesta del paisaje, lo que puede enmarcar mejor los riesgos inmediatos y a más largo plazo para las poblaciones costeras en el futuro^{232, 235}.

Descripción de confianza y probabilidad

Con base en observaciones y modelos predictivos, los autores tienen una confianza alta en que es muy probable que la sostenibilidad a largo plazo de nuestros ecosistemas costeros y sistemas humanos se vea afectada por los cambios climáticos, en particular debido a la pérdida de tierras. Las observaciones y los modelos también nos han dado una confianza alta en que es muy probable que las medidas humanas que históricamente se han utilizado para limitar el cambio costero y que se han basado predominantemente en soluciones de infraestructura dura y fija para proteger el desarrollo hagan que las áreas costeras sean menos resilientes a los cambios futuros amplificados por los factores climáticos. Con esta reducción de resiliencia, numerosos estudios han demostrado que existe confianza alta en que los ecosistemas costeros limiten su capacidad de prestar los servicios de los que depende el ser humano y es muy probable que ocurra. Según la variedad de literatura y estudios disponibles, existe una confianza alta en que la pérdida de estos servicios requerirá estrategias proactivas para abordar impactos significativos y en cascada en ciudades, comunidades y costumbres en la zona costera y es muy probable que ocurra.

Mensaje clave 9.3

La adaptación reduce el riesgo y aporta beneficios adicionales a las comunidades costeras

Descripción de la base de evidencia

Dado que los peligros costeros seguirán empeorando y que aumentarán los impactos sobre los entornos naturales y construidos, las comunidades costeras tendrán que adaptarse (o seguir adaptándose) al cambio climático. No se espera que las estrategias habituales sean suficientes en el futuro porque no abordan las causas profundas de la vulnerabilidad de las comunidades costeras^{9, 14, 15} ni reconocen que el nivel del mar seguirá subiendo más allá de los horizontes temporales habituales de planificación de infraestructuras^{141, 236}.

Cada vez hay un mayor consenso al momento de apoyar las soluciones basadas en la naturaleza (nature-based solutions, NBS) y estrategias como la reubicación planificada como componentes esenciales de la adaptación climática^{149, 153, 169, 237}. Cada vez hay más literatura que demuestra que las NBS pueden proteger contra el riesgo de inundaciones^{115, 160, 164, 165, 237}. Múltiples estudios basados en experimentos de laboratorio han demostrado la capacidad de las NBS para atenuar la energía de las olas, las corrientes y las marejadas ciclónicas en una serie de condiciones controladas^{238, 239}. Otros estudios basados en mediciones sobre el terreno durante eventos costeros extremos han validado estos resultados en una serie de entornos geográficos y condiciones ambientales y meteorológicas extremas^{154, 156, 240}. Los estudios de modelación numérica han ampliado estos resultados a eventos de baja frecuencia y a una gama más amplia de condiciones extremas^{114, 161, 162}. Cada vez hay más evidencia de la funcionalidad y el rendimiento de las NBS para la reducción del riesgo de inundaciones. Este conjunto de literatura respalda un número cada vez mayor de directrices y orientaciones prácticas para la planificación, el diseño y la implementación de las NBS^{149, 169}. Las agencias estatales están empezando a exigir que se prioricen las NBS para la adaptación costera, siempre que sea posible, en vez de a las infraestructuras reforzadas.

La reubicación planificada sigue siendo un tema de debate polémico en las comunidades costeras, pero cada vez hay más evidencia que demuestra la apertura de las comunidades a incluir estas estrategias en los debates sobre planificación a largo plazo²⁴¹. Esto es especialmente cierto si se amplía la definición de reubicación planificada para incluir diferentes cambios de política de uso de la tierra que son herramientas habituales de planificación, como los contratiempos o las servidumbres²⁴², así como debates y planificación dirigidos por la comunidad²⁴³.

La adaptación transformadora al SLR es posible, en parte, gracias al conjunto de esfuerzos empleados para proporcionar información significativa y comprensible a las partes interesadas costeras. En las zonas costeras, las partes interesadas abarcan una amplia gama de sectores, que lidian con diferentes prioridades, calendarios y urgencias que, a menudo, conducen a necesidades diferentes. Por ejemplo, los ecologistas que diseñan la restauración de un humedal necesitan estimaciones probabilísticas del SLR a corto plazo, mientras que los planificadores de infraestructuras críticas necesitan comprender el conjunto completo de posibles riesgos tanto a corto como a largo plazo para tomar decisiones e inversiones acertadas para las comunidades a las que sirven. El estado actual de la ciencia y la correspondiente orientación sobre cómo tomar decisiones ante lo conocido y lo desconocido en torno al aumento del nivel del mar (p. ej., <u>Guía de aplicación del informe técnico sobre el SLR de 2022</u>) son indicadores esenciales de que la adaptación transformadora, incluidas las NBS y la migración, es factible¹.

Principales incertidumbres y brechas en la investigación

Aunque en general se entiende que los proyectos de reducción del riesgo de inundaciones fluviales, como el aumento de la altura de los diques, podrían exacerbar los riesgos de inundación en las comunidades situadas aguas abajo, se entiende menos el potencial de un desvío similar de los riesgos de inundación de una comunidad en entornos costeros. En la Bahía de San Francisco, un estudio de modelación demostró que la adición de un dique o malecón para proteger una comunidad podría aumentar los riesgos de inundación en otros lugares de la costa estuarina⁶. Puede ser importante considerar este concepto de manera más amplia a lo largo de la costa, ya que se cruza con consideraciones de equidad si las comunidades con menos recursos para adaptarse se enfrentan a mayores riesgos desviados de las comunidades con mayores recursos.

A pesar del creciente número de estudios que investigan y validan el rendimiento de las NBS para la reducción del riesgo de inundaciones, aún existen brechas en la investigación con respecto a la incertidumbre en los beneficios de la reducción del riesgo de inundaciones en una serie de condiciones ambientales y peligros futuros, dada la naturaleza dinámica intrínseca de los sistemas de NBS. Específicamente, ¿qué estrategias funcionan en zonas costeras activas con gran energía de las olas? Además, faltan investigaciones sobre estrategias de NBS en entornos extremos, especialmente el Ártico, donde los enfoques tradicionales centrados en la vegetación no resultan prácticos. Esto es especialmente relevante en el oeste de Alaska, donde las comunidades están experimentando crecientes riesgos de inundación y la protección tradicional contra las inundaciones es extremadamente costosa. Aunque se ha avanzado en el desarrollo de normas y directrices para utilizar las NBS con el fin de reducir el riesgo de inundaciones ^{149, 167, 168, 169}, sigue siendo necesario que organizaciones profesionales de ingeniería y organizaciones no gubernamentales amplíen la documentación existente.

Las incertidumbres y las brechas de la investigación sobre la reubicación planificada tienden a centrarse en el proceso y la voluntad de reubicación de las comunidades: ¿Cuáles son los puntos de inflexión que animan a una comunidad a adoptar la reubicación planificada a escala comunitaria? ¿A dónde deben trasladarse las personas? ¿Las comunidades receptoras están preparadas para acoger a una población cada vez mayor? ¿Cómo se paga la reubicación? ¿Cómo superar las barreras psicológicas que se oponen a una reubicación planificada?

Falta literatura sobre las estructuras de gobernanza, las leyes y las políticas necesarias para apoyar la adaptación transformadora, incluida la reubicación planificada. Para superar la brecha entre la planificación de la adaptación y la implementación con éxito de las soluciones de adaptación sobre el terreno es necesario superar los retos de la gobernanza²⁴⁴. Aunque el número de análisis jurídicos pertinentes para la adaptación es cada vez mayor, estos análisis siguen siendo limitados en cuanto a su implementación práctica y su alcance^{245, 246}. La investigación ha demostrado el valor de las políticas, las leyes y los esfuerzos multidireccionales para estimular la planificación climática y la adaptación, en particular el beneficio de las leyes descendentes que dirigen la necesidad de planificar e implementar la adaptación sin ser excesivamente prescriptivas⁵³; sin embargo, este trabajo se encuentra en sus primeras fases. Los análisis exhaustivos que exploran cómo las políticas actuales impiden o fomentan la adaptación transformadora al clima ayudarían a sintetizar e identificar dónde podrían introducirse mejoras dentro de las estructuras de gobernanza para apoyar una adaptación exitosa.

La investigación sobre los factores económicos y sociales que impulsan y obstaculizan la adaptación transformadora en las comunidades costeras es limitada. También faltan investigaciones sobre los requisitos previos de psicología social necesarios para que la adaptación transformadora tenga éxito. ¿Cómo una comunidad costera sabrá cuándo los residentes están preparados para iniciar el camino de la adaptación transformadora? ¿Cómo puede fomentarse la preparación psicológica, incluida la comunicación efectiva de las condiciones futuras que pueden obligar a este tipo de acción?

Más allá de las NBS y la reubicación planificada, muchas adaptaciones progresivas se comprenden bien solo en términos de implementación e impacto. Por ejemplo, muchas comunidades tienen experiencia en la elevación de carreteras, el redimensionamiento de alcantarillas de drenaje y la construcción de estructuras de estabilización del litoral. Sin embargo, faltan investigaciones que generen orientaciones efectivas para medidas de mayor envergadura, como el abandono o la reubicación de infraestructuras y la agregación de medidas de menor envergadura. Aunque existe un compendio emergente de investigación sobre este tema para las acciones individuales^{174, 247, 248}, se carece de un análisis a escala comunitaria de una serie de acciones de adaptación y plazos.

El compendio de investigación que apoya la adaptación transformadora es cada vez mayor; sin embargo, gran parte de esta investigación no está adaptada a las comunidades costeras. Existe una brecha en la investigación sobre las condiciones previas y los motores del éxito en las comunidades costeras. Además, también existe una brecha en la investigación que evalúa la efectividad de los enfoques de mitigación y adaptación en escenarios de baja probabilidad y alto impacto, dado que estos enfoques cambian necesariamente en escenarios extremos de SLR.

Descripción de confianza y probabilidad

El aumento de los riesgos costeros, el cambio de las pautas meteorológicas y las tormentas extremas están provocando cambios rápidos y generalizados en las costas de nuestra Nación (confianza alta). En la actualidad, los esfuerzos de adaptación suelen ser progresivos y sectoriales (p. ej., centrados en la adaptación de una planta de tratamiento de aguas residuales o de un tramo de carretera), y no a escala comunitaria (confianza alta). A medida que el SLR se acelere, exponiendo a mayores poblaciones y geografías a los peligros costeros, este enfoque de adaptación se volverá inefectivo.

Las respuestas de adaptación que van más allá de las soluciones tradicionales pueden incluir soluciones basadas en la naturaleza y la reubicación planificada. Existe una confianza media en que las soluciones basadas en la naturaleza y las estrategias de reubicación planificada, cuando están dirigidas por la comunidad y centradas en la equidad, pueden proporcionar una respuesta equitativa a los peligros costeros y a los impactos del cambio climático. Existe una confianza media en que la adaptación transformadora que centra a la comunidad en la planificación, el diseño y la implementación de soluciones con múltiples

La Quinta Evaluación Nacional del Clima

beneficios puede mantener mejor las conexiones sociales, culturales y económicas que las comunidades necesitan para prosperar.

Las declaraciones de este mensaje clave se apoyan tanto en la literatura citada como en la comprensión del equipo autor del estado de la práctica de adaptación en una amplia variedad de comunidades costeras, tanto en geografía como en sistemas sociales. Esta perspectiva centrada en la comunidad complementa la literatura publicada y permite a los autores reflejar el consenso más actual sobre este tema.

Referencias

- 1. Collini, R., J. Carter, L. Auermuller, L. Engeman, K. Hintzen, J. Gambill, R. Johnson, I. Miller, C. Schafer, and H. Stiller, 2022: Application Guide for the 2022 Sea Level Rise Technical Report. Mississippi–Alabama Sea Grant Consortium (MASGP-22-028) and Florida Sea Grant (SGEB 88). National Oceanic and Atmospheric Administration, Office for Coastal Management. https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/sealevelrise-tech-report-sections. html#application-guide
- 2. Sweet, W.V., B.D. Hamlington, R.E. Kopp, C.P. Weaver, P.L. Barnard, D. Bekaert, W. Brooks, M. Craghan, G. Dusek, T. Frederikse, G. Garner, A.S. Genz, J.P. Krasting, E. Larour, D. Marcy, J.J. Marra, J. Obeysekera, M. Osler, M. Pendleton, D. Roman, L. Schmied, W. Veatch, K.D. White, and C. Zuzak, 2022: Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Updated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines. NOAA Technical Report NOS 01. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 111 pp. https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/sealevelrise-tech-report-sections.html
- 3. Titus, J.G., 2023: Population in floodplains or close to sea level increased in US but declined in some counties—Especially among black residents. *Environmental Research Letters*, **18** (3), 034001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acadf5
- 4. Hummel, M.A., R. Griffin, K. Arkema, and A.D. Guerry, 2021: Economic evaluation of sea-level rise adaptation strongly influenced by hydrodynamic feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **118** (29), e2025961118. https://doi.org/10.1073/pnas.2025961118
- 5. Nunn, P.D., C. Klöck, and V. Duvat, 2021: Seawalls as maladaptations along island coasts. Ocean & Coastal Management, 205, 105554. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105554
- 6. Wang, R.-Q., M.T. Stacey, L.M.M. Herdman, P.L. Barnard, and L. Erikson, 2018: The influence of sea level rise on the regional interdependence of coastal infrastructure. Earth's Future, **6** (5), 677–688. https://doi.org/10.1002/2017ef000742
- 7. Sahavacharin, A., P. Sompongchaiyakul, and D. Thaitakoo, 2022: The effects of land-based change on coastal ecosystems. Landscape and Ecological Engineering, 18 (3), 351–366. https://doi.org/10.1007/s11355-022-00505-x
- 8. NCEI, 2022: U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Centers for Environmental Information. https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/
- 9. Hardy, R.D., R.A. Milligan, and N. Heynen, 2017: Racial coastal formation: The environmental injustice of colorblind adaptation planning for sea-level rise. *Geoforum*, **87**, 62–72. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.10.005
- Green, K.M., J.C. Selgrath, T.H. Frawley, W.K. Oestreich, E.J. Mansfield, J. Urteaga, S.S. Swanson, F.N. Santana, S.J. Green, J. Naggea, and L.B. Crowder, 2021: How adaptive capacity shapes the Adapt, React, Cope response to climate impacts: Insights from small-scale fisheries. Climatic Change, 164 (1), 15. https://doi.org/10.1007/s10584-021-02965-w
- Oestreich, W.K., T.H. Frawley, E.J. Mansfield, K.M. Green, S.J. Green, J. Naggea, J.C. Selgrath, S.S. Swanson, J. Urteaga, T.D. White, and L.B. Crowder, 2019: Ch. 26. The impact of environmental change on small-scale fishing communities: Moving beyond adaptive capacity to community response. In: Predicting Future Oceans. Cisneros-Montemayor, A.M., W.W.L. Cheung, and Y. Ota, Eds. Elsevier, 271–282. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817945-1.00027-7
- 12. Siders, A.R., I. Ajibade, and D. Casagrande, 2021: Transformative potential of managed retreat as climate adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **50**, 272–280. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.06.007
- 13. Fedele, G., C.I. Donatti, C.A. Harvey, L. Hannah, and D.G. Hole, 2019: Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy*, **101**, 116–125. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.001
- 14. Kuhl, L., M.F. Rahman, S. McCraine, D. Krause, M.F. Hossain, A.V. Bahadur, and S. Huq, 2021: Transformational adaptation in the context of coastal cities. *Annual Review of Environment and Resources*, **46** (1), 449–479. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045211
- 15. Shi, L. and S. Moser, 2021: Transformative climate adaptation in the United States: Trends and prospects. *Science*, **372** (6549), 8054. https://doi.org/10.1126/science.abc8054

- 16. Hay, C.C., E. Morrow, R.E. Kopp, and J.X. Mitrovica, 2015: Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature*, **517** (7535), 481–484. https://doi.org/10.1038/nature14093
- 17. Beckley, B., X. Yang, N.P. Zelensky, S.A. Holmes, F.G. Lemoine, R.D. Ray, G.T. Mitchum, S. Desai, and S.T. Brown. 2021: Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters TOPEX/Poseidon, Jason-1, OSTM/Jason-2, and Jason-3 Version 5.1. NASA Goddard Space Flight Center. https://doi.org/10.5067/gmslm-tj151
- 18. Thompson, P.R., M.J. Widlansky, E. Leuliette, D.P. Chambers, W. Sweet, B.D. Hamlington, S. Jevrejeva, M.A. Merrifield, G.T. Mitchum, and R.S. Nerem, 2022: Sea level variability and change in [State of the Climate in 2021]. Bulletin of the American Meteorological Society, 103 (8), S168–S172. https://doi.org/10.1175/2022bamsstateoftheclimate.1
- 19. Guérou, A., B. Meyssignac, P. Prandi, M. Ablain, A. Ribes, and F. Bignalet-Cazalet, 2023: Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty. Ocean Science, **19** (2), 431–451. https://doi.org/10.5194/os-19-431-2023
- 20. Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ch. 9. Ocean, cryosphere and sea level change. 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, 1211–1362. https://doi.org/10.1017/9781009157896.011
- 21. Sweet, W.V., R.E. Kopp, C.P. Weaver, J. Obeysekera, R.M. Horton, E.R. Thieler, and C. Zervas, 2017: Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 75 pp. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/18399
- 22. Dokka, R.K., 2011: The role of deep processes in late 20th century subsidence of New Orleans and coastal areas of southern Louisiana and Mississippi. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **116** (B6). https://doi.org/10.1029/2010jb008008
- 23. Kolker, A.S., M.A. Allison, and S. Hameed, 2011: An evaluation of subsidence rates and sea-level variability in the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, **38** (21). https://doi.org/10.1029/2011gl049458
- 24. Hamlington, B.D., T. Frederikse, P.R. Thompson, J.K. Willis, R.S. Nerem, and J.T. Fasullo, 2021: Past, present, and future Pacific sea-level change. *Earth's Future*, **9** (4), e2020EF001839. https://doi.org/10.1029/2020ef001839
- 25. Barnard, P.L., D. Hoover, D.M. Hubbard, A. Snyder, B.C. Ludka, J. Allan, G.M. Kaminsky, P. Ruggiero, T.W. Gallien, L. Gabel, D. McCandless, H.M. Weiner, N. Cohn, D.L. Anderson, and K.A. Serafin, 2017: Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015–2016 El Niño. *Nature Communications*, **8**, 14365. https://doi.org/10.1038/ncomms14365
- 26. Hamlington, B.D., R.R. Leben, K.Y. Kim, R.S. Nerem, L.P. Atkinson, and P.R. Thompson, 2015: The effect of the El Niño–Southern Oscillation on U.S. regional and coastal sea level. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **120** (6), 3970–3986. https://doi.org/10.1002/2014jc010602
- 27. Wolter, K., 1987: The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **26** (4), 540–558. DOI:10.1175/1520-0450(1987)026<0540:tsoisc>2.0.co;2. https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/26/4/1520-0450_1987_026_0540_tsoisc_2_0_co_2.xml
- 28. Riahi, K., R. Schaeffer, J. Arango, K. Calvin, C. Guivarch, T. Hasegawa, K. Jiang, E. Kriegler, R. Matthews, G.P. Peters, A. Rao, S. Robertson, A.M. Sebbit, J. Steinberger, M. Tavoni, and D.P. van Vuuren, 2022: Ch. 3. Mitigation pathways compatible with long-term goals. 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.A. Khourdajie, R.v. 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, 295–408. https://doi.org/10.1017/9781009157926.005
- IPCC, 2023: Summary for policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups
 I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Lee, H. and J. Romero,
 Eds. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 1-34. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

- 30. Kopp, R.E., F.J. Simons, J.X. Mitrovica, A.C. Maloof, and M. Oppenheimer, 2009: Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. *Nature*, **462** (7275), 863–867. https://doi.org/10.1038/nature08686
- 31. Sweet, W., G. Dusek, J.T.B. Obeysekera, and J.J. Marra, 2018: Patterns and Projections of High Tide Flooding Along the U.S. Coastline Using a Common Impact Threshold. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 086. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD. https://doi.org/10.7289/v5/tr-nos-coops-086
- 32. Tebaldi, C., B.H. Strauss, and C.E. Zervas, 2012: Modelling sea level rise impacts on storm surges along US coasts. Environmental Research Letters, 7 (1), 014032. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014032
- 33. Sweet, W., G. Dusek, D. Marcy, G. Carbin, and J. Marra, 2019: 2018 State of U.S. High Tide Flooding with a 2019 Outlook. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 090. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/20691
- 34. Sweet, W., G. Dusek, G. Carbin, J. Marra, D. Marcy, and S. Simon, 2020: 2019 State of U.S. High Tide Flooding with a 2020 Outlook. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 092. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/25241
- 35. Sweet, W., S. Simon, G. Dusek, D. Marcy, W. Brooks, M. Pendleton, and J. Marra, 2021: 2021 State of High Tide Flooding and Annual Outlook. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD. https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/2021_State_of_High_Tide_Flooding_and_Annual_Outlook_Final.pdf
- 36. Thompson, P.R., M.J. Widlansky, B.D. Hamlington, M.A. Merrifield, J.J. Marra, G.T. Mitchum, and W. Sweet, 2021: Rapid increases and extreme months in projections of United States high-tide flooding. *Nature Climate Change*, **11** (7), 584–590. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01077-8
- 37. Barnard, P.L., L.H. Erikson, A.C. Foxgrover, J.A.F. Hart, P. Limber, A.C. O'Neill, M. van Ormondt, S. Vitousek, N. Wood, M.K. Hayden, and J.M. Jones, 2019: Dynamic flood modeling essential to assess the coastal impacts of climate change. Scientific Reports, 9 (1), 4309. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40742-z
- 38. Magnan, A.K., M. Oppenheimer, M. Garschagen, M.K. Buchanan, V.K.E. Duvat, D.L. Forbes, J.D. Ford, E. Lambert, J. Petzold, F.G. Renaud, Z. Sebesvari, R.S.W. van de Wal, J. Hinkel, and H.-O. Pörtner, 2022: Sea level rise risks and societal adaptation benefits in low-lying coastal areas. Scientific Reports, 12 (1), 10677. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14303-w
- 39. Toimil, A., M. Álvarez-Cuesta, and I.J. Losada, 2023: Neglecting the effect of long- and short-term erosion can lead to spurious coastal flood risk projections and maladaptation. *Coastal Engineering*, **179**, 104248. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104248
- 40. Stockdon, H.F., R.A. Holman, P.A. Howd, and A.H. Sallenger Jr., 2006: Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, **53** (7), 573–588. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005
- 41. Vitousek, S., P.L. Barnard, C.H. Fletcher, N. Frazer, L. Erikson, and C.D. Storlazzi, 2017: Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7 (1), 1399. https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7
- 42. Wahl, T., S. Jain, J. Bender, S.D. Meyers, and M.E. Luther, 2015: Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nature Climate Change*, **5** (12), 1093–1097. https://doi.org/10.1038/nclimate2736
- 43. Zscheischler, J., S. Westra, B.J.J.M. van den Hurk, S.I. Seneviratne, P.J. Ward, A. Pitman, A. AghaKouchak, D.N. Bresch, M. Leonard, T. Wahl, and X. Zhang, 2018: Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, **8** (6), 469–477. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3
- 44. Feng, D., Z. Tan, D. Engwirda, C. Liao, D. Xu, G. Bisht, T. Zhou, H.Y. Li, and L.R. Leung, 2022: Investigating coastal backwater effects and flooding in the coastal zone using a global river transport model on an unstructured mesh. Hydrology and Earth System Sciences, 26 (21), 5473–5491. https://doi.org/10.5194/hess-26-5473-2022
- 45. Xu, K., C. Wang, and L. Bin, 2023: Compound flood models in coastal areas: A review of methods and uncertainty analysis. *Natural Hazards*, **116** (1), 469–496. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05683-3
- 46. Davidson-Arnott, R., B. Bauer, and C. Houser, 2019: Introduction to Coastal Processes and Geomorphology, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. https://doi.org/10.1017/9781108546126

- 47. Lentz, E.E., S.L. Zeigler, E.R. Thieler, and N.G. Plant, 2021: Probabilistic patterns of inundation and biogeomorphic changes due to sea-level rise along the northeastern U.S. Atlantic coast. Landscape Ecology, **36** (1), 223–241. https://doi.org/10.1007/s10980-020-01136-z
- 48. Shope, J.B., L.H. Erikson, P.L. Barnard, C.D. Storlazzi, K. Serafin, K. Doran, H. Stockdon, B. Reguero, F. Mendez, S. Castanedo, A. Cid, L. Cagigal, and P. Ruggiero, 2022: Characterizing storm-induced coastal change hazards along the United States West Coast. Scientific Data, **9** (1), 224. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01313-6
- 49. Vitousek, S., P.L. Barnard, and P. Limber, 2017: Can beaches survive climate change? *Journal of Geophysical Research:* Earth Surface, 122 (4), 1060–1067. https://doi.org/10.1002/2017JF004308
- 50. Zeigler, S.L., B.T. Gutierrez, E.E. Lentz, N.G. Plant, E.J. Sturdivant, and K.S. Doran, 2022: Predicted sea-level rise-driven biogeomorphological changes on Fire Island, New York: Implications for people and plovers. Earth's Future, 10 (4), e2021EF002436. https://doi.org/10.1029/2021ef002436
- 51. Brown, B.B., I. Altman, and C.M. Werner, 2012: Place attachment. In: International Encyclopedia of Housing and Home. Smith, S.J., Ed. Elsevier, San Diego, CA, 183–188. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047163-1.00543-9
- 52. Bongarts Lebbe, T., H. Rey-Valette, É. Chaumillon, G. Camus, R. Almar, A. Cazenave, J. Claudet, N. Rocle, C. Meur-Férec, F. Viard, D. Mercier, C. Dupuy, F. Ménard, B.A. Rossel, L. Mullineaux, M.-A. Sicre, A. Zivian, F. Gaill, and A. Euzen, 2021: Designing coastal adaptation strategies to tackle sea level rise. Frontiers in Marine Science, 8, 740602. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.740602
- 53. Holmes, T.J. and W.H. Butler, 2021: Implementing a mandate to plan for sea level rise: Top-down, bottom-up, and middle-out actions in the Tampa Bay region. *Journal of Environmental Planning and Management*, **64** (12), 2214–2232. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1865885
- 54. Dupigny-Giroux, L.A., E.L. Mecray, M.D. Lemcke-Stampone, G.A. Hodgkins, E.E. Lentz, K.E. Mills, E.D. Lane, R. Miller, D.Y. Hollinger, W.D. Solecki, G.A. Wellenius, P.E. Sheffield, A.B. MacDonald, and C. Caldwell, 2018: Ch. 18. Northeast. In: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II. Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D. Easterling, K. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 669–742. https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch18
- 55. Gori, A., N. Lin, D. Xi, and K. Emanuel, 2022: Tropical cyclone climatology change greatly exacerbates US extreme rainfall–surge hazard. *Nature Climate Change*, **12** (2), 171–178. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01272-7
- 56. Dacre, H.F. and J.G. Pinto, 2020: Serial clustering of extratropical cyclones: A review of where, when and why it occurs. npj Climate and Atmospheric Science, **3** (1), 48. https://doi.org/10.1038/s41612-020-00152-9
- 57. Bilskie, M.V., S.C. Hagen, S.C. Medeiros, and D.L. Passeri, 2014: Dynamics of sea level rise and coastal flooding on a changing landscape. *Geophysical Research Letters*, **41** (3), 927–934. https://doi.org/10.1002/2013gl058759
- 58. Passeri, D.L., S.C. Hagen, S.C. Medeiros, M.V. Bilskie, K. Alizad, and D. Wang, 2015: The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. Earth's Future, **3** (6), 159–181. https://doi.org/10.1002/2015ef000298
- 59. Bilskie, M.V., S.C. Hagen, K. Alizad, S.C. Medeiros, D.L. Passeri, H.F. Needham, and A. Cox, 2016: Dynamic simulation and numerical analysis of hurricane storm surge under sea level rise with geomorphologic changes along the northern Gulf of Mexico. Earth's Future, 4 (5), 177–193. https://doi.org/10.1002/2015ef000347
- 60. Passeri, D.L., M.V. Bilskie, N.G. Plant, J.W. Long, and S.C. Hagen, 2018: Dynamic modeling of barrier island response to hurricane storm surge under future sea level rise. *Climatic Change*, **149** (3), 413–425. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2245-8
- 61. Passeri, D.L., S.C. Hagen, M.V. Bilskie, and S.C. Medeiros, 2015: On the significance of incorporating shoreline changes for evaluating coastal hydrodynamics under sea level rise scenarios. *Natural Hazards*, **75** (2), 1599–1617. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1386-y
- 62. EPA, 2021: Climate Change and Social Vulnerability in the United States: A Focus on Six Impacts. EPA 430-R-21-003. U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/cira/social-vulnerability-report
- 63. Helderop, E. and T.H. Grubesic, 2019: Social, geomorphic, and climatic factors driving U.S. coastal city vulnerability to storm surge flooding. Ocean & Coastal Management, **181**, 104902. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104902

- 64. Neumann, B., A.T. Vafeidis, J. Zimmermann, and R.J. Nicholls, 2015: Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding—A global assessment. PLoS ONE, **10** (3), e0118571. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571
- 65. Rotzoll, K. and C.H. Fletcher, 2013: Assessment of groundwater inundation as a consequence of sea-level rise. Nature Climate Change, **3** (5), 477–481. https://doi.org/10.1038/nclimate1725
- 66. Storlazzi, C.D., S.B. Gingerich, A. van Dongeren, O.M. Cheriton, P.W. Swarzenski, E. Quataert, C.I. Voss, D.W. Field, H. Annamalai, G.A. Piniak, and R. McCall, 2018: Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding. *Science Advances*, **4** (4), 9741. https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9741
- 67. Sukop, M.C., M. Rogers, G. Guannel, J.M. Infanti, and K. Hagemann, 2018: High temporal resolution modeling of the impact of rain, tides, and sea level rise on water table flooding in the Arch Creek Basin, Miami-Dade County Florida USA. Science of The Total Environment, 616–617, 1668–1688. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.170
- 68. Masterson, J.P., M.N. Fienen, E.R. Thieler, D.B. Gesch, B.T. Gutierrez, and N.G. Plant, 2014: Effects of sea-level rise on barrier island groundwater system dynamics—Ecohydrological implications. *Ecohydrology*, 7 (3), 1064–1071. https://doi.org/10.1002/eco.1442
- 69. Befus, K.M., P.L. Barnard, D.J. Hoover, J.A. Finzi Hart, and C.I. Voss, 2020: Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California. *Nature Climate Change*, **10** (10), 946–952. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0874-1
- 70. Plane, E., K. Hill, and C. May, 2019: A rapid assessment method to identify potential groundwater flooding hotspots as sea levels rise in coastal cities. *Water*, **11** (11), 2228. https://doi.org/10.3390/w1112228
- 71. Jasechko, S., D. Perrone, H. Seybold, Y. Fan, and J.W. Kirchner, 2020: Groundwater level observations in 250,000 coastal US wells reveal scope of potential seawater intrusion. *Nature Communications*, **11** (1), 3229. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17038-2
- 72. Cox, A.H., G.W. Loomis, and J.A. Amador, 2019: Preliminary evidence that rising groundwater tables threaten coastal septic systems. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, **5** (4), 04019007. https://doi.org/10.1061/jswbay.0000887
- 73. Gold, A.C., C.M. Brown, S.P. Thompson, and M.F. Piehler, 2022: Inundation of stormwater infrastructure is common and increases risk of flooding in coastal urban areas along the US Atlantic coast. *Earth's Future*, **10** (3), e2021EF002139. https://doi.org/10.1029/2021ef002139
- 74. Hughes, J., K. Cowper-Heays, E. Olesson, R. Bell, and A. Stroombergen, 2021: Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management*, **31**, 100262. https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100262
- 75. Kirchhoff, C.J. and P.L. Watson, 2019: Are wastewater systems adapting to climate change? JAWRA Journal of the American Water Resources Association, **55** (4), 869–880. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12748
- 76. Sadler, J.M., J.L. Goodall, M. Behl, B.D. Bowes, and M.M. Morsy, 2020: Exploring real-time control of stormwater systems for mitigating flood risk due to sea level rise. *Journal of Hydrology*, **583**, 124571. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124571
- 77. Davtalab, R., A. Mirchi, R.J. Harris, M.X. Troilo, and K. Madani, 2020: Sea level rise effect on groundwater rise and stormwater retention pond reliability. *Water*, **12** (4), 1129. https://doi.org/10.3390/w12041129
- 78. Fant, C., J.M. Jacobs, P. Chinowsky, W. Sweet, N. Weiss, J.E. Sias, J. Martinich, and J.E. Neumann, 2021: Mere nuisance or growing threat? The physical and economic impact of high tide flooding on US road networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 27 (4), 04021044. https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000652
- 79. Hino, M., S.T. Belanger, C.B. Field, A.R. Davies, and K.J. Mach, 2019: High-tide flooding disrupts local economic activity. Science Advances, 5 (2), 2736. https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2736
- 80. Hino, M. and M. Burke, 2021: The effect of information about climate risk on property values. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 118 (17), e2003374118. https://doi.org/10.1073/pnas.2003374118

- 81. Jacobs, J.M., L.R. Cattaneo, W. Sweet, and T. Mansfield, 2018: Recent and future outlooks for nuisance flooding impacts on roadways on the U.S. East Coast. *Transportation Research Record*, **2672** (2), 1–10. https://doi.org/10.1177/0361198118756366
- 82. Moser, S.C. and J.A.F. Hart, 2015: The long arm of climate change: Societal teleconnections and the future of climate change impacts studies. *Climatic Change*, **129** (1), 13–26. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1328-z
- 83. Gibson, N., S. McNulty, C. Miller, M. Gavazzi, E. Worley, D. Keesee, and D. Hollinger, 2021: Identification, Mitigation, and Adaptation to Salinization on Working Lands in the U.S. Southeast. Gen. Tech. Rep. SRS-259. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC, 69 pp. https://doi.org/10.2737/srs-gtr-259
- 84. USDA, 2020: Saltwater Intrusion: A Growing Threat to Coastal Agriculture. U.S. Department of Agriculture, Northeast Climate Hub, 2 pp. https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northeast/topic/saltwater-intrusion-growing-threat-coastal-agriculture
- 85. Bick, I.A., A.F. Santiago Tate, K.A. Serafin, A. Miltenberger, I. Anyansi, M. Evans, L. Ortolano, D. Ouyang, and J. Suckale, 2021: Rising seas, rising inequity? Communities at risk in the San Francisco Bay Area and implications for adaptation policy. *Earth's Future*, **9** (7), e2020EF001963. https://doi.org/10.1029/2020ef001963
- 86. Handwerger, L.R., M.M. Sugg, and J.D. Runkle, 2021: Present and future sea level rise at the intersection of race and poverty in the Carolinas: A geospatial analysis. The Journal of Climate Change and Health, 3, 100028. https://doi.org/10.1016/j.joclim.2021.100028
- 87. Tate, E., M.A. Rahman, C.T. Emrich, and C.C. Sampson, 2021: Flood exposure and social vulnerability in the United States. *Natural Hazards*, **106** (1), 435–457. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2
- 88. Berberian, A.G., D.J.X. Gonzalez, and L.J. Cushing, 2022: Racial disparities in climate change-related health effects in the United States. *Current Environmental Health Reports*, **9** (3), 451–464. https://doi.org/10.1007/s40572-022-00360-w
- 89. Lieberman-Cribbin, W., C. Gillezeau, R.M. Schwartz, and E. Taioli, 2021: Unequal social vulnerability to Hurricane Sandy flood exposure. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, **31** (5), 804–809. https://doi.org/10.1038/s41370-020-0230-6
- 90. Rhubart, D. and Y. Sun, 2021: The social correlates of flood risk: Variation along the US rural-urban continuum. Population and Environment, **43** (2), 232–256. https://doi.org/10.1007/s11111-021-00388-4
- 91. Flores, A.B., A. Castor, S.E. Grineski, T.W. Collins, and C. Mullen, 2021: Petrochemical releases disproportionately affected socially vulnerable populations along the Texas Gulf Coast after Hurricane Harvey. *Population and Environment*, **42** (3), 279–301. https://doi.org/10.1007/s1111-020-00362-6
- 92. Linscott, G., A. Rishworth, B. King, and M.P. Hiestand, 2022: Uneven experiences of urban flooding: Examining the 2010 Nashville flood. Natural Hazards, **110** (1), 629–653. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04961-w
- 93. Nowak, D.J., A. Ellis, and E.J. Greenfield, 2022: The disparity in tree cover and ecosystem service values among redlining classes in the United States. Landscape and Urban Planning, **221**, 104370. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104370
- 94. An, B., A.W. Orlando, and S. Rodnyansky, 2019: The Physical Legacy of Racism: How Redlining Cemented the Modern Built Environment. Social Science Research Network. https://doi.org/10.2139/ssrn.3500612
- 95. Hui Mālama Loko I'a, 2020: Loko I'a Needs Assessment. University of Hawai'i, Sea Grant College Program and Pacific Islands Climate Adaptation Science Center. https://seagrant.soest.hawaii.edu/loko-i%CA%BBa-needs-assessment/
- 96. Tran, J., L.M. Divine, and L.R. Heffner, 2021: "What are you going to do, protest the wind?": Community perceptions of emergent and worsening coastal erosion from the remote Bering Sea community of St. Paul, Alaska. Environmental Management, 67 (1), 43–66. https://doi.org/10.1007/s00267-020-01382-6
- 97. Hampton, S. and J. Curtis, 2022: A bridge over troubled water? Flood insurance and the governance of climate change adaptation. *Geoforum*, **136**, 80–91. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.08.008
- 98. Netusil, N.R., C. Kousky, S. Neupane, W. Daniel, and H. Kunreuther, 2021: The willingness to pay for flood insurance. *Land Economics*, **97** (1), 17–38. https://doi.org/10.3368/wple.97.1.110819-0160r1

- 99. Best, K. and Z. Jouzi, 2022: Climate gentrification: Methods, gaps, and framework for future research. Frontiers in Climate, 4, 828067. https://doi.org/10.3389/fclim.2022.828067
- 100. Hu, S., 2020: What is Climate Gentrification? Natural Resources Defense Council. https://www.nrdc.org/stories/ what-climate-gentrification
- 101. Nguyen, A., 2021: What Is Climate Gentrification? Sustainable and Social. https://sustainableandsocial.com/climate-gentrification/
- 102. Gould, K.A. and T.L. Lewis, 2021: Resilience gentrification: Environmental privilege in an age of coastal climate disasters. Frontiers in Sustainable Cities, **3**, 687670. https://doi.org/10.3389/frsc.2021.687670
- 103. Javeline, D., T. Kijewski-Correa, and A. Chesler, 2019: Does it matter if you "believe" in climate change? Not for coastal home vulnerability. *Climatic Change*, **155** (4), 511–532. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02513-7
- 104. Melix, B.L., A. Jackson, W. Butler, T. Holmes, and C.K. Uejio, 2022: Locating neighborhood displacement risks to climate gentrification pressures in three coastal counties in Florida. *The Professional Geographer*, **75** (1), 31–43. https://doi.org/10.1080/00330124.2022.2087695
- 105. Gittman, R.K., F.J. Fodrie, A.M. Popowich, D.A. Keller, J.F. Bruno, C.A. Currin, C.H. Peterson, and M.F. Piehler, 2015: Engineering away our natural defenses: An analysis of shoreline hardening in the US. Frontiers in Ecology and the Environment, 13 (6), 301–307. https://doi.org/10.1890/150065
- 106. Griggs, G. and K. Patsch, 2019: The protection/hardening of California's coast: Times are changing. *Journal of Coastal Research*, **35** (5), 1051–1061. https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-19a-00007.1
- 107. Pelletier, J.D., A. Brad Murray, J.L. Pierce, P.R. Bierman, D.D. Breshears, B.T. Crosby, M. Ellis, E. Foufoula-Georgiou, A.M. Heimsath, C. Houser, N. Lancaster, M. Marani, D.J. Merritts, L.J. Moore, J.L. Pederson, M.J. Poulos, T.M. Rittenour, J.C. Rowland, P. Ruggiero, D.J. Ward, A.D. Wickert, and E.M. Yager, 2015: Forecasting the response of Earth's surface to future climatic and land use changes: A review of methods and research needs. Earth's Future, 3 (7), 220–251. https://doi.org/10.1002/2014ef000290
- 108. Bender, S.R., 2019: Ch. 7. Floodplain infrastructure and the toxic tide. In: Impact of Water Pollution on Human Health and Environmental Sustainability. McKeown, A.E. and G. Bugyi, Eds. IGI Global, 150–173. https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9559-7.ch007
- 109. Colloff, M.J., R. Gorddard, N. Abel, B. Locatelli, C. Wyborn, J.R.A. Butler, S. Lavorel, L. van Kerkhoff, S. Meharg, C. Múnera-Roldán, E. Bruley, G. Fedele, R.M. Wise, and M. Dunlop, 2021: Adapting transformation and transforming adaptation to climate change using a pathways approach. *Environmental Science & Policy*, **124**, 163–174. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.06.014
- 110. Barnard, P.L., J.E. Dugan, H.M. Page, N.J. Wood, J.A.F. Hart, D.R. Cayan, L.H. Erikson, D.M. Hubbard, M.R. Myers, J.M. Melack, and S.F. Iacobellis, 2021: Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems. *Scientific Reports*, **11** (1), 15560. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94942-7
- 111. Borchert, S.M., M.J. Osland, N.M. Enwright, and K.T. Griffith, 2018: Coastal wetland adaptation to sea level rise: Quantifying potential for landward migration and coastal squeeze. *Journal of Applied Ecology*, **55** (6), 2876–2887. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13169
- 112. Ganju, N.K., B.R. Couvillion, Z. Defne, and K.V. Ackerman, 2022: Development and application of Landsat-based wetland vegetation cover and unvegetated-vegetated marsh ratio (UVVR) for the conterminous United States. Estuaries and Coasts, **45**, 1861–1878. https://doi.org/10.1007/s12237-022-01081-x
- 113. Tavares, K.-D., C.H. Fletcher, and T.R. Anderson, 2020: Risk of shoreline hardening and associated beach loss peaks before mid-century: Опаhu, Hawaiпi. Scientific Reports, **10** (1), 13633. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70577-y
- 114. Menéndez, P., I.J. Losada, S. Torres-Ortega, S. Narayan, and M.W. Beck, 2020: The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, **10** (1), 4404. https://doi.org/10.1038/s41598-020-61136-6
- 115. Temmerman, S., E.M. Horstman, K.W. Krauss, J.C. Mullarney, I. Pelckmans, and K. Schoutens, 2023: Marshes and mangroves as nature-based coastal storm buffers. *Annual Review of Marine Science*, **15**, 95–118. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-040422-092951
- 116. Campbell, A.D., L. Fatoyinbo, L. Goldberg, and D. Lagomasino, 2022: Global hotspots of salt marsh change and carbon emissions. *Nature*, **612** (7941), 701–706. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05355-z

- 117. Weis, J.S., E.B. Watson, B. Ravit, C. Harman, and M. Yepsen, 2021: The status and future of tidal marshes in New Jersey faced with sea level rise. *Anthropocene Coasts*, **4** (1), 168–192. https://doi.org/10.1139/anc-2020-0020
- 118. Fagherazzi, S., G. Mariotti, N. Leonardi, A. Canestrelli, W. Nardin, and W.S. Kearney, 2020: Salt marsh dynamics in a period of accelerated sea level rise. *Journal of Geophysical Research*: Earth Surface, **125** (8), e2019JF005200. https://doi.org/10.1029/2019jf005200
- 119. Osland, M.J., B. Chivoiu, N.M. Enwright, K.M. Thorne, G.R. Guntenspergen, J.B. Grace, L.L. Dale, W. Brooks, N. Herold, J.W. Day, F.H. Sklar, and C.M. Swarzenzki, 2022: Migration and transformation of coastal wetlands in response to rising seas. Science Advances, 8 (26), 5174. https://doi.org/10.1126/sciadv.abo5174
- 120. Buchanan, M.K., S. Kulp, and B. Strauss, 2022: Resilience of U.S. coastal wetlands to accelerating sea level rise. Environmental Research Communications, 4 (6), 061001. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac6eef
- 121. Schieder, N.W., D.C. Walters, and M.L. Kirwan, 2018: Massive upland to wetland conversion compensated for historical marsh loss in Chesapeake Bay, USA. Estuaries and Coasts, **41** (4), 940–951. https://doi.org/10.1007/s12237-017-0336-9
- 122. Raabe, E.A. and R.P. Stumpf, 2016: Expansion of tidal marsh in response to sea-level rise: Gulf Coast of Florida, USA. Estuaries and Coasts, **39** (1), 145–157. https://doi.org/10.1007/s12237-015-9974-y
- 123. Armitage, A.R., W.E. Highfield, S.D. Brody, and P. Louchouarn, 2015: The contribution of mangrove expansion to salt marsh loss on the Texas Gulf Coast. PLoS ONE, **10** (5), 0125404. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125404
- 124. Thorne, K., G. MacDonald, G. Guntenspergen, R. Ambrose, K. Buffington, B. Dugger, C. Freeman, C. Janousek, L. Brown, J. Rosencranz, J. Holmquist, J. Smol, K. Hargan, and J. Takekawa, 2018: U.S. Pacific coastal wetland resilience and vulnerability to sea-level rise. Science Advances, 4 (2), eaao3270. https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3270
- 125. Barbier, E.B., S.D. Hacker, C. Kennedy, E.W. Koch, A.C. Stier, and B.R. Silliman, 2011: The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, **81** (2), 169–193. https://doi.org/10.1890/10-1510.1
- 126. Correll, M.D., W.A. Wiest, B.J. Olsen, W.G. Shriver, C.S. Elphick, and T.P. Hodgman, 2016: Habitat specialization explains avian persistence in tidal marshes. *Ecosphere*, **7** (11), e01506. https://doi.org/10.1002/ecs2.1506
- 127. Narayan, S., M.W. Beck, P. Wilson, C.J. Thomas, A. Guerrero, C.C. Shepard, B.G. Reguero, G. Franco, J.C. Ingram, and D. Trespalacios, 2017: The value of coastal wetlands for flood damage reduction in the northeastern USA. *Scientific Reports*, 7 (1), 9463. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09269-z
- 128. Shepard, C.C., C.M. Crain, and M.W. Beck, 2011: The protective role of coastal marshes: A systematic review and meta-analysis. PLoS ONE, **6** (11), e27374. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027374
- 129. Spalding, M.D., S. Ruffo, C. Lacambra, I. Meliane, L.Z. Hale, C.C. Shepard, and M.W. Beck, 2014: The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. Ocean & Coastal Management, **90**, 50–57. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.007
- 130. Lorenzo-Trueba, J. and A.D. Ashton, 2014: Rollover, drowning, and discontinuous retreat: Distinct modes of barrier response to sea-level rise arising from a simple morphodynamic model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **119** (4), 779–801. https://doi.org/10.1002/2013jf002941
- 131. Miselis, J.L. and J. Lorenzo-Trueba, 2017: Natural and human-induced variability in barrier-island response to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, **44** (23), 11922–11931. https://doi.org/10.1002/2017g1074811
- 132. Passeri, D.L., P.S. Dalyander, J.W. Long, R.C. Mickey, R.L. Jenkins III, D.M. Thompson, N.G. Plant, E.S. Godsey, and V.M. Gonzalez, 2020: The roles of storminess and sea level rise in decadal barrier island evolution. *Geophysical Research Letters*, **47** (18), e2020GL089370. https://doi.org/10.1029/2020gl089370
- 133. Reeves, I.R.B., L.J. Moore, E.B. Goldstein, A.B. Murray, J.A. Carr, and M.L. Kirwan, 2020: Impacts of seagrass dynamics on the coupled long-term evolution of barrier-marsh-bay systems. *Journal of Geophysical Research:* Biogeosciences, **125** (2), e2019JG005416. https://doi.org/10.1029/2019jg005416
- 134. Rogers, L.J., L.J. Moore, E.B. Goldstein, C.J. Hein, J. Lorenzo-Trueba, and A.D. Ashton, 2015: Anthropogenic controls on overwash deposition: Evidence and consequences. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, **120** (12), 2609–2624. https://doi.org/10.1002/2015jf003634

- 135. Zinnert, J.C., S.M. Via, B.P. Nettleton, P.A. Tuley, L.J. Moore, and J.A. Stallins, 2019: Connectivity in coastal systems: Barrier island vegetation influences upland migration in a changing climate. *Global Change Biology*, **25** (7), 2419–2430. https://doi.org/10.1111/gcb.14635
- 136. Dow, K., F. Berkhout, B.L. Preston, R.J.T. Klein, G. Midgley, and M.R. Shaw, 2013: Limits to adaptation. *Nature Climate Change*, **3** (4), 305–307. https://doi.org/10.1038/nclimate1847
- 137. Ward, N.D., J.P. Megonigal, B. Bond-Lamberty, V.L. Bailey, D. Butman, E.A. Canuel, H. Diefenderfer, N.K. Ganju, M.A. Goñi, E.B. Graham, C.S. Hopkinson, T. Khangaonkar, J.A. Langley, N.G. McDowell, A.N. Myers-Pigg, R.B. Neumann, C.L. Osburn, R.M. Price, J. Rowland, A. Sengupta, M. Simard, P.E. Thornton, M. Tzortziou, R. Vargas, P.B. Weisenhorn, and L. Windham-Myers, 2020: Representing the function and sensitivity of coastal interfaces in Earth system models. *Nature Communications*, **11** (1), 2458. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16236-2
- 138. Enwright, N.M., K.T. Griffith, and M.J. Osland, 2016: Barriers to and opportunities for landward migration of coastal wetlands with sea-level rise. Frontiers in Ecology and the Environment, **14** (6), 307–316. https://doi.org/10.1002/fee.1282
- 139. Gedan, K.B. and E. Fernández-Pascual, 2019: Salt marsh migration into salinized agricultural fields: A novel assembly of plant communities. *Journal of Vegetation Science*, **30** (5), 1007–1016. https://doi.org/10.1111/jvs.12774
- 140. Davis, R.A., 2019: Human impact on coasts. In: Encyclopedia of Coastal Science. Finkl, C.W. and C. Makowski, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 983–991. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_175
- 141. Rasmussen, D.J., M.K. Buchanan, R.E. Kopp, and M. Oppenheimer, 2020: A flood damage allowance framework for coastal protection with deep uncertainty in sea level rise. Earth's Future, **8** (3), e2019EF001340. https://doi.org/10.1029/2019ef001340
- 142. Fuentes, M., 2020: Rising sea levels will become California's greatest land use challenge: How the state of California must take a stronger role in requiring local governments to adopt adaptive land use controls in order to prevent economic and environmental destruction resulting from sea level rise. *Environs: Environmental Law and Policy Journal*, **44** (1). https://environs.law.ucdavis.edu/volumes/44/1/fuentes.pdf
- 143. Zhao, L. and F. Liu, 2020: Land-use planning adaptation in response to SLR based on a vulnerability analysis. *Ocean & Coastal Management*, **196**, 105297. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105297
- 144. Guerry, A.D., J. Silver, J. Beagle, K. Wyatt, K. Arkema, J. Lowe, P. Hamel, R. Griffin, S. Wolny, E. Plane, M. Griswold, H. Papendick, and J. Sharma, 2022: Protection and restoration of coastal habitats yield multiple benefits for urban residents as sea levels rise. npj Urban Sustainability, 2 (1), 13. https://doi.org/10.1038/s42949-022-00056-y
- 145. Butler, W.H., R.E. Deyle, and C. Mutnansky, 2016: Low-regrets incrementalism: Land use planning adaptation to accelerating sea level rise in Florida's coastal communities. *Journal of Planning Education and Research*, **36** (3), 319–332. https://doi.org/10.1177/0739456x16647161
- 146. Burgos, A.G., B.D. Hamlington, P.R. Thompson, and R.D. Ray, 2018: Future nuisance flooding in Norfolk, VA, from astronomical tides and annual to decadal internal climate variability. *Geophysical Research Letters*, **45** (22), 12432–12439. https://doi.org/10.1029/2018gl079572
- 147. Norfolk City Council, 2022: The General Plan of the City of Norfolk. City of Norfolk, Norfolk, VA. https://www.norfolk.gov/DocumentCenter/View/2483/plaNorfolk2030?bidId
- 148. Waggonner & Ball, n.d.: Norfolk Ohio Creek Watershed Resilience. Waggonner & Ball Architecture/Environment, New Orleans, LA, accessed September 19, 2022. https://wbae.com/projects/norfolk-ohio-creek-watershed-resilience/
- 149. Bridges, T.S., J.K. King, J.D. Simm, M.W. Beck, G. Collins, Q. Lodder, and R.K. Mohan, 2021: International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management. Special Report No. ERDC SR-21-6. U.S. Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. https://doi.org/10.21079/11681/41946
- 150. Ommer, J., E. Bucchignani, L.S. Leo, M. Kalas, S. Vranić, S. Debele, P. Kumar, H.L. Cloke, and S. Di Sabatino, 2022: Quantifying co-benefits and disbenefits of nature-based solutions targeting disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **75**, 102966. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102966
- 151. Veerkamp, C., E. Ramieri, L. Romanovska, M. Zandersen, J. Förster, M. Rogger, and L. Martinsen, 2021: Assessment Frameworks of Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction. ETC/CCA Technical Paper 2021/3. European Topic Centre Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation. https://doi.org/10.25424/cmcc/nbs_assessment_approaches

- 152. Vouk, I., V. Pilechi, M. Provan, and E. Murphy, 2021: Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management. Canadian Standards Association, Toronto, ON. https://www.csagroup.org/article/research/nature-based-solutions-for-coastal-and-riverine-flood-and-erosion-risk-management/
- 153. Bridges, T.S., P.W. Wagner, K.A. Burks-Copes, M.E. Bates, Z.A. Collier, J.C. Fischenich, J.Z. Gailani, L.D. Leuck, C.D. Piercy, J.D. Rosati, E.J. Russo, D.J. Shafer, B.C. Suedel, E.A. Vuxton, and T.V. Wamsley, 2015: Use of Natural and Nature-Based Features (NNBF) for Coastal Resilience. ERDC SR-15-1. U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Environmental Laboratory. https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/3442/
- 154. Garzon, J.L., M. Maza, C.M. Ferreira, J.L. Lara, and I.J. Losada, 2019: Wave attenuation by Spartina saltmarshes in the Chesapeake Bay under storm surge conditions. *Journal of Geophysical Research*: Oceans, **124** (7), 5220–5243. https://doi.org/10.1029/2018jc014865
- 155. Maza, M., J.L. Lara, and I.J. Losada, 2021: Predicting the evolution of coastal protection service with mangrove forest age. *Coastal Engineering*, **168**, 103922. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103922
- 156. Möller, I., M. Kudella, F. Rupprecht, T. Spencer, M. Paul, B.K. van Wesenbeeck, G. Wolters, K. Jensen, T.J. Bouma, M. Miranda-Lange, and S. Schimmels, 2014: Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience*, **7** (10), 727–731. https://doi.org/10.1038/ngeo2251
- 157. Pennings, S.C., R.M. Glazner, Z.J. Hughes, J.S. Kominoski, and A.R. Armitage, 2021: Effects of mangrove cover on coastal erosion during a hurricane in Texas, USA. Ecology, **102** (4), e03309. https://doi.org/10.1002/ecy.3309
- 158. Fairchild, T.P., W.G. Bennett, G. Smith, B. Day, M.W. Skov, I. Möller, N. Beaumont, H. Karunarathna, and J.N. Griffin, 2021: Coastal wetlands mitigate storm flooding and associated costs in estuaries. *Environmental Research Letters*, 16 (7), 074034. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0c45
- 159. Glass, E.M., J.L. Garzon, S. Lawler, E. Paquier, and C.M. Ferreira, 2018: Potential of marshes to attenuate storm surge water level in the Chesapeake Bay. Limnology and Oceanography, 63 (2), 951–967. https://doi.org/10.1002/lno.10682
- 160. Figlus, J., 2022: Ch. 21. Designing and implementing coastal dunes for flood risk reduction. In: Coastal Flood Risk Reduction. Brody, S., Y. Lee, and B.B. Kothuis, Eds. Elsevier, 287–301. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85251-7.00021-4
- 161. Beck, M.W., I.J. Losada, P. Menéndez, B.G. Reguero, P. Díaz-Simal, and F. Fernández, 2018: The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nature Communications*, **9** (1), 2186. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04568-z
- 162. Reguero, B.G., C.D. Storlazzi, A.E. Gibbs, J.B. Shope, A.D. Cole, K.A. Cumming, and M.W. Beck, 2021: The value of US coral reefs for flood risk reduction. *Nature Sustainability*, **4** (8), 688–698. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00706-6
- 163. Storlazzi, C.D., B.G. Reguero, A.D. Cole, E. Lowe, J.B. Shope, A.E. Gibbs, B.A. Nickel, R.T. McCall, A.R. van Dongeren, and M.W. Beck, 2019: Rigorously Valuing the Role of U.S. Coral Reefs in Coastal Hazard Risk Reduction. USGS Open-File Report 2019–1027. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 42 pp. https://doi.org/10.3133/ofr20191027
- 164. Bilkovic, D.M., M.M. Mitchell, M.K. La Peyre, and J.D.E. Toft, Eds., 2017: Living Shorelines: The Science and Management of Nature-Based Coastal Protection. 1st ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 519 pp. https://doi.org/10.1201/9781315151465
- 165. Morris, R.L., M.K. La Peyre, B.M. Webb, D.A. Marshall, D.M. Bilkovic, J. Cebrian, G. McClenachan, K.M. Kibler, L.J. Walters, D. Bushek, E.L. Sparks, N.A. Temple, J. Moody, K. Angstadt, J. Goff, M. Boswell, P. Sacks, and S.E. Swearer, 2021: Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration. Ecological Applications, 31 (6), e02382. https://doi.org/10.1002/eap.2382
- 166. Marin-Diaz, B., G.S. Fivash, J. Nauta, R.J.M. Temmink, N. Hijner, V.C. Reijers, P.P.M.J.M. Cruijsen, K. Didderen, J.H.T. Heusinkveld, E. Penning, G. Maldonado-Garcia, J. van Belzen, J.C. de Smit, M.J.A. Christianen, T. van der Heide, D. van der Wal, H. Olff, T.J. Bouma, and L.L. Govers, 2021: On the use of large-scale biodegradable artificial reefs for intertidal foreshore stabilization. Ecological Engineering, 170, 106354. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106354
- 167. FEMA, 2021: Building Community Resilience with Nature-Based Solutions: A Guide for Local Communities. U.S. Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency. https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_riskmap-nature-based-solutions-guide_2021.pdf

- 168. Green-Gray Community of Practice, 2020: Practical Guide to Implementing Green-Gray Infrastructure. Green-Gray Community of Practice. https://www.conservation.org/projects/global-green-gray-community-of-practice
- 169. Webb, B., B. Dix, S. Douglass, S. Asam, C. Cherry, and B. Buhring, 2019: Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide. FHWA-HEP-19-042. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington DC. https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resilience/ongoing_and_current_research/green_infrastructure/implementation_guide/
- 170. Mitchell, M. and D.M. Bilkovic, 2019: Embracing dynamic design for climate-resilient living shorelines. *Journal of Applied Ecology*, **56** (5), 1099–1105. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13371
- 171. Nunez, K., T. Rudnicky, P. Mason, C. Tombleson, and M. Berman, 2022: A geospatial modeling approach to assess site suitability of living shorelines and emphasize best shoreline management practices. Ecological Engineering, 179, 106617. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106617
- 172. Ajibade, I., M. Sullivan, and M. Haeffner, 2020: Why climate migration is not managed retreat: Six justifications. *Global Environmental Change*, **65**, 102187. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102187
- 173. Fussell, E. and B. Castro, 2022: Ch. 10. Environmentally informed migration in North America. In: *International Handbook of Population and Environment*. Hunter, L.M., C. Gray, and J. Véron, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 205–223. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76433-3_10
- 174. Bragg, W.K., S.T. Gonzalez, A. Rabearisoa, and A.D. Stoltz, 2021: Communicating managed retreat in California. Water, **13** (6), 781. https://doi.org/10.3390/w13060781
- 175. McGhee, D.J., S.B. Binder, and E.A. Albright, 2020: First, do no harm: Evaluating the vulnerability reduction of post-disaster home buyout programs. Natural Hazards Review, **21** (1), 05019002. https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000337
- 176. Simms, J.R.Z., H.L. Waller, C. Brunet, and P. Jenkins, 2021: The long goodbye on a disappearing, ancestral island: A just retreat from Isle de Jean Charles. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **11**, 316–328. https://doi.org/10.1007/s13412-021-00682-5
- 177. Palinkas, L.A., 2020: Ch. 7. Fleeing coastal erosion: Kivalina and Isle de Jean Charles. In: *Global Climate Change*, Population Displacement, and Public Health. Springer, Cham, Switzerland, 127–145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41890-8 7
- 178. Ajibade, I., M. Sullivan, C. Lower, L. Yarina, and A. Reilly, 2022: Are managed retreat programs successful and just? A global mapping of success typologies, justice dimensions, and trade-offs. *Global Environmental Change*, **76**, 102576. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102576
- 179. Siders, A.R., 2019: Managed retreat in the United States. One Earth, 1 (2), 216–225. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.09.008
- 180. Griggs, G. and B.G. Reguero, 2021: Coastal adaptation to climate change and sea-level rise. Water, 13 (16), 2151. https://doi.org/10.3390/w13162151
- 181. Priestley, R.K., Z. Heine, and T.L. Milfont, 2021: Public understanding of climate change-related sea-level rise. PLoS ONE, **16** (7), e0254348. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254348
- 182. Noy, I., 2020: Paying a price of climate change: Who pays for managed retreats? *Current Climate Change Reports*, **6** (1), 17–23. https://doi.org/10.1007/s40641-020-00155-x
- 183. Hino, M., C.B. Field, and K.J. Mach, 2017: Managed retreat as a response to natural hazard risk. Nature Climate Change, 7 (5), 364–370. https://doi.org/10.1038/nclimate3252
- 184. Tubridy, F., M. Lennon, and M. Scott, 2022: Managed retreat and coastal climate change adaptation: The environmental justice implications and value of a coproduction approach. *Land Use Policy*, **114**, 105960. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105960
- 185. O'Donnell, T., 2022: Managed retreat and planned retreat: A systematic literature review. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 377 (1854), 20210129. https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0129

- 186. Fitton, J.M., K.A. Addo, P.-N. Jayson-Quashigah, G.J. Nagy, O. Gutiérrez, D. Panario, I. Carro, L. Seijo, C. Segura, J.E. Verocai, S. Luoma, J. Klein, T.-T. Zhang, J. Birchall, and P. Stempel, 2021: Challenges to climate change adaptation in coastal small towns: Examples from Ghana, Uruguay, Finland, Denmark, and Alaska. Ocean & Coastal Management, 212, 105787. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105787
- 187. Howell, J. and J.R. Elliott, 2018: As disaster costs rise, so does inequality. Socius, **4**, 2378023118816795. https://doi.org/10.1177/2378023118816795
- 188. Fleming, E., J. Payne, W. Sweet, M. Craghan, J. Haines, J.F. Hart, H. Stiller, and A. Sutton-Grier, 2018: Ch. 8. Coastal effects. In: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II. Reidmiller, D.R., C.W. Avery, D. Easterling, K. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 322–352. https://doi.org/10.7930/nca4.2018.ch8
- 189. IPCC, 2021: 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, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896
- 190. Dangendorf, S., C. Hay, F.M. Calafat, M. Marcos, C.G. Piecuch, K. Berk, and J. Jensen, 2019: Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, **9** (9), 705–710. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8
- 191. Frederikse, T., F. Landerer, L. Caron, S. Adhikari, D. Parkes, V.W. Humphrey, S. Dangendorf, P. Hogarth, L. Zanna, L. Cheng, and Y.-H. Wu, 2020: The causes of sea-level rise since 1900. *Nature*, **584** (7821), 393–397. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3
- 192. Hamlington, B.D., M. Osler, N. Vinogradova, and W.V. Sweet, 2021: Coordinated science support for sea-level data and services in the United States. AGU Advances, 2 (2), e2021AV000418. https://doi.org/10.1029/2021av000418
- 193. Edwards, T.L., S. Nowicki, B. Marzeion, R. Hock, H. Goelzer, H. Seroussi, N.C. Jourdain, D.A. Slater, F.E. Turner, C.J. Smith, C.M. McKenna, E. Simon, A. Abe-Ouchi, J.M. Gregory, E. Larour, W.H. Lipscomb, A.J. Payne, A. Shepherd, C. Agosta, P. Alexander, T. Albrecht, B. Anderson, X. Asay-Davis, A. Aschwanden, A. Barthel, A. Bliss, R. Calov, C. Chambers, N. Champollion, Y. Choi, R. Cullather, J. Cuzzone, C. Dumas, D. Felikson, X. Fettweis, K. Fujita, B.K. Galton-Fenzi, R. Gladstone, N.R. Golledge, R. Greve, T. Hattermann, M.J. Hoffman, A. Humbert, M. Huss, P. Huybrechts, W. Immerzeel, T. Kleiner, P. Kraaijenbrink, S. Le clec'h, V. Lee, G.R. Leguy, C.M. Little, D.P. Lowry, J.-H. Malles, D.F. Martin, F. Maussion, M. Morlighem, J.F. O'Neill, I. Nias, F. Pattyn, T. Pelle, S.F. Price, A. Quiquet, V. Radić, R. Reese, D.R. Rounce, M. Rückamp, A. Sakai, C. Shafer, N.-J. Schlegel, S. Shannon, R.S. Smith, F. Straneo, S. Sun, L. Tarasov, L.D. Trusel, J. Van Breedam, R. van de Wal, M. van den Broeke, R. Winkelmann, H. Zekollari, C. Zhao, T. Zhang, and T. Zwinger, 2021: Projected land ice contributions to twenty-first-century sea level rise. Nature, 593 (7857), 74–82. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03302-y
- 194. Taherkhani, M., S. Vitousek, P.L. Barnard, N. Frazer, T.R. Anderson, and C.H. Fletcher, 2020: Sea-level rise exponentially increases coastal flood frequency. *Scientific Reports*, **10** (1), 6466. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62188-4
- 195. USGCRP, 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I. Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock, Eds. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp. https://doi.org/10.7930/j0j964j6
- 196. Chen, X. and L.R. Leung, 2020: Response of landfalling atmospheric rivers on the U.S. West Coast to local sea surface temperature perturbations. *Geophysical Research Letters*, **47** (18), e2020GL089254. https://doi.org/10.1029/2020gl089254
- 197. Hagos, S.M., L.R. Leung, J.-H. Yoon, J. Lu, and Y. Gao, 2016: A projection of changes in landfalling atmospheric river frequency and extreme precipitation over western North America from the Large Ensemble CESM simulations. Geophysical Research Letters, **43** (3), 1357–1363. https://doi.org/10.1002/2015gl067392
- 198. Patricola, C.M., M.F. Wehner, E. Bercos-Hickey, F.V. Maciel, C. May, M. Mak, O. Yip, A.M. Roche, and S. Leal, 2022: Future changes in extreme precipitation over the San Francisco Bay Area: Dependence on atmospheric river and extratropical cyclone events. Weather and Climate Extremes, 36, 100440. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100440
- 199. Hauer, M.E., J.M. Evans, and D.R. Mishra, 2016: Millions projected to be at risk from sea-level rise in the continental United States. *Nature Climate Change*, **6** (7), 691–695. https://doi.org/10.1038/nclimate2961

- 200. Merkens, J.-L., L. Reimann, J. Hinkel, and A.T. Vafeidis, 2016: Gridded population projections for the coastal zone under the Shared Socioeconomic Pathways. *Global and Planetary Change*, **145**, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.08.009
- 201. Strauss, B.H., S.A. Kulp, D.J. Rasmussen, and A. Levermann, 2021: Unprecedented threats to cities from multicentury sea level rise. Environmental Research Letters, 16 (11), 114015. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2e6b
- 202. Kirwan, M.L. and K.B. Gedan, 2019: Sea-level driven land conversion and the formation of ghost forests. *Nature Climate Change*, **9** (6), 450–457. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0488-7
- 203. Kirwan, M.L., G.R. Guntenspergen, A. D'Alpaos, J.T. Morris, S.M. Mudd, and S. Temmerman, 2010: Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical Research Letters*, **37** (23), L23401. https://doi.org/10.1029/2010g1045489
- 204. Siverd, C.G., S.C. Hagen, M.V. Bilskie, D.H. Braud, and R.R. Twilley, 2020: Quantifying storm surge and risk reduction costs: A case study for Lafitte, Louisiana. *Climatic Change*, **161** (1), 201–223. https://doi.org/10.1007/s10584-019-02636-x
- 205. Weiskopf, S.R., M.A. Rubenstein, L.G. Crozier, S. Gaichas, R. Griffis, J.E. Halofsky, K.J. Hyde, T.L. Morelli, J.T. Morisette, R.C. Muñoz, A.J. Pershing, D.L. Petersone, R. Poudel, M.D. Staudinger, A.E. Sutton-Grier, L. Thompson, J. Vose, J.F. Weltzin, and K.P. Whyte, 2020: Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 733, 137782. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782
- 206. Gittman, R.K., S.B. Scyphers, C.S. Smith, I.P. Neylan, and J.H. Grabowski, 2016: Ecological consequences of shoreline hardening: A meta-analysis. BioScience, **66**, 763–773. https://doi.org/10.1093/biosci/biw091
- 207. Bouwer, L.M., 2019: Ch. 3. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage. In: Loss and Damage from Climate Change: Concepts, Methods and Policy Options. Mechler, R., L.M. Bouwer, T. Schinko, S. Surminski, and J. Linnerooth-Bayer, Eds. Springer, Cham, Switzerland, 63–82. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72026-5_3
- 208. Smiley, K.T., I. Noy, M.F. Wehner, D. Frame, C.C. Sampson, and O.E.J. Wing, 2022: Social inequalities in climate change-attributed impacts of Hurricane Harvey. *Nature Communications*, **13** (1), 3418. https://doi.org/10.1038/s41467-022-31056-2
- 209. Al-Attabi, Z., Y. Xu, G. Tso, and S. Narayan, 2023: The impacts of tidal wetland loss and coastal development on storm surge damages to people and property: A Hurricane Ike case-study. Scientific Reports, **13** (1), 4620. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31409-x
- 210. Coutu, P., 2018: Tidal flooding could pose serious problems for Chesapeake Bay restoration, professor says. *The Virginian-Pilot*, November 2, 2018. https://www.pilotonline.com/news/environment/article_39835cd2-d798-11e8-87a8-9be3908f9d79.html
- 211. Makwana, N., 2019: Disaster and its impact on mental health: A narrative review. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, **8** (10). https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_893_19
- 212. Erickson, T.B., J. Brooks, E.J. Nilles, P.N. Pham, and P. Vinck, 2019: Environmental health effects attributed to toxic and infectious agents following hurricanes, cyclones, flash floods and major hydrometeorological events. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, Part B, **22** (5–6), 157–171. https://doi.org/10.1080/10937404.2019.1654422
- 213. Gobler, C.J., 2020: Climate change and harmful algal blooms: Insights and perspective. Harmful Algae, **91**, 101731. https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101731
- 214. Raker, E.J., 2022: Climate-related disasters and children's health: Evidence from Hurricane Harvey. Socius, **8**, 23780231221135971. https://doi.org/10.1177/23780231221135971
- 215. Conzelmann, C., A. Salazar-Miranda, T. Phan, and J.S. Hoffman, 2022: Long-Term Causal Effects of Redlining on Environmental Risk Exposure. Working Paper 22-09R. Federal Reserve Bank of Richmond. https://doi.org/10.21144/wp22-09
- 216. Erman, A., E. Motte, R. Goyal, A. Asare, S. Takamatsu, X. Chen, S. Malgioglio, A. Skinner, N. Yoshida, and S. Hallegatte, 2020: The road to recovery the role of poverty in the exposure, vulnerability and resilience to floods in Accra. Economics of Disasters and Climate Change, **4** (1), 171–193. https://doi.org/10.1007/s41885-019-00056-w

- 217. Griego, A.L., A.B. Flores, T.W. Collins, and S.E. Grineski, 2020: Social vulnerability, disaster assistance, and recovery: A population-based study of Hurricane Harvey in Greater Houston, Texas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **51**, 101766. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101766
- 218. Sou, G., D. Shaw, and F. Aponte-Gonzalez, 2021: A multidimensional framework for disaster recovery: Longitudinal qualitative evidence from Puerto Rican households. *World Development*, **144**, 105489. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105489
- 219. Dundon, L.A. and J.S. Camp, 2021: Climate justice and home-buyout programs: Renters as a forgotten population in managed retreat actions. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, **11**, 420–433. https://doi.org/10.1007/s13412-021-00691-4
- 220. Bento, A. and J.R. Elliott, 2022: The racially unequal impacts of disasters and federal recovery assistance on local self-employment rates. Social Currents, 9 (2), 118–138. https://doi.org/10.1177/23294965211028841
- 221. EcoSystems, 2014: Preparing for Sea Level Rise through Hazard Mitigation: Analysis of Risks & Recommendations. EcoSystems, Inc. https://coastalresilience.tamu.edu/files/2014/06/Sea-Level-Rise_Final.pdf
- 222. WSAV, 2018: Infrastructure upgrades for Tybee Island. WSAV News, September 18, 2018. https://www.wsav.com/news/local-news/infrastructure-upgrades-for-tybee-island/
- 223. Coutu, P., 2021: In Norfolk, sea level rise reduces some stormwater system capacity by 50%, data shows. *The Virginian*-Pilot, January 3, 2021. https://www.pilotonline.com/news/environment/vp-nw-fz20-sensor-stormwater-flooding-norfolk-20210103-t4jofv7hbff3dgcposbf7z7p5m-story.html
- 224. Fagherazzi, S., M.L. Kirwan, S.M. Mudd, G.R. Guntenspergen, S. Temmerman, A. D'Alpaos, J. van de Koppel, J.M. Rybczyk, E. Reyes, C. Craft, and J. Clough, 2012: Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics*, **50** (1). https://doi.org/10.1029/2011rg000359
- 225. Kirwan, M.L., S. Temmerman, E.E. Skeehan, G.R. Guntenspergen, and S. Fagherazzi, 2016: Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change*, **6** (3), 253–260. https://doi.org/10.1038/nclimate2909
- 226. Ganju, N.K., Z. Defne, M.L. Kirwan, S. Fagherazzi, A. D'Alpaos, and L. Carniello, 2017: Spatially integrative metrics reveal hidden vulnerability of microtidal salt marshes. *Nature Communications*, **8** (1), 14156. https://doi.org/10.1038/ncomms14156
- 227. Luijendijk, A., G. Hagenaars, R. Ranasinghe, F. Baart, G. Donchyts, and S. Aarninkhof, 2018: The state of the world's beaches. Scientific Reports, 8 (1), 6641. https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6
- 228. Vitousek, S., K. Vos, K.D. Splinter, L. Erikson, and P.L. Barnard, 2023: A model integrating satellite-derived shoreline observations for predicting fine-scale shoreline response to waves and sea-level rise across large coastal regions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **128** (7), e2022JF006936. https://doi.org/10.1029/2022JF006936
- 229. Vos, K., M.D. Harley, K.D. Splinter, J.A. Simmons, and I.L. Turner, 2019: Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, **150**, 160–174. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004
- 230. Michael, H.A., V.E.A. Post, A.M. Wilson, and A.D. Werner, 2017: Science, society, and the coastal groundwater squeeze. Water Resources Research, **53** (4), 2610–2617. https://doi.org/10.1002/2017wr020851
- 231. Panthi, J., S.M. Pradhanang, A. Nolte, and T.B. Boving, 2022: Saltwater intrusion into coastal aquifers in the contiguous United States—A systematic review of investigation approaches and monitoring networks. *Science of The Total Environment*, **836**, 155641. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155641
- 232. Harden, C.P., A. Chin, M.R. English, R. Fu, K.A. Galvin, A.K. Gerlak, P.F. McDowell, D.E. McNamara, J.M. Peterson, N.L. Poff, E.A. Rosa, W.D. Solecki, and E.E. Wohl, 2014: Understanding human–landscape interactions in the "Anthropocene". *Environmental Management*, **53** (1), 4–13. https://doi.org/10.1007/s00267-013-0082-0
- 233. Lipiec, E., P. Ruggiero, A. Mills, K.A. Serafin, J. Bolte, P. Corcoran, J. Stevenson, C. Zanocco, and D. Lach, 2018: Mapping out climate change: Assessing how coastal communities adapt using alternative future scenarios. *Journal of Coastal Research*, **34** (5), 1196–1208. https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-17-00115.1
- 234. Mullin, M., M.D. Smith, and D.E. McNamara, 2019: Paying to save the beach: Effects of local finance decisions on coastal management. *Climatic Change*, **152** (2), 275–289. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2191-5

- 235. McNamara, D.E., A.B. Murray, and M.D. Smith, 2011: Coastal sustainability depends on how economic and coastline responses to climate change affect each other. *Geophysical Research Letters*, **38** (7). https://doi.org/10.1029/2011g1047207
- 236. Casey, A. and A. Becker, 2019: Institutional and conceptual barriers to climate change adaptation for coastal cultural heritage. Coastal Management, 47 (2), 169–188. https://doi.org/10.1080/08920753.2019.1564952
- 237. Singhvi, A., A.P. Luijendijk, and A.P.E. van Oudenhoven, 2022: The grey-green spectrum: A review of coastal protection interventions. *Journal of Environmental Management*, **311**, 114824. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824
- 238. Kelty, K., T. Tomiczek, D.T. Cox, P. Lomonaco, and W. Mitchell, 2022: Prototype-scale physical model of wave attenuation through a mangrove forest of moderate cross-shore thickness: Lidar-based characterization and Reynolds scaling for engineering with nature. Frontiers in Marine Science, 8, 780946. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.780946
- 239. Maza, M., J.L. Lara, and I.J. Losada, 2019: Experimental analysis of wave attenuation and drag forces in a realistic fringe *Rhizophora* mangrove forest. *Advances in Water Resources*, **131**, 103376. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.07.006
- 240. Smith, C.S., B. Puckett, R.K. Gittman, and C.H. Peterson, 2018: Living shorelines enhanced the resilience of saltmarshes to Hurricane Matthew (2016). Ecological Applications, 28 (4), 871–877. https://doi.org/10.1002/eap.1722
- 241. King, D., D. Bird, K. Haynes, H. Boon, A. Cottrell, J. Millar, T. Okada, P. Box, D. Keogh, and M. Thomas, 2014: Voluntary relocation as an adaptation strategy to extreme weather events. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **8**, 83–90. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.02.006
- 242. Lester, C., G. Griggs, K. Patsch, and R. Anderson, 2022: Shoreline retreat in California: Taking a step back. *Journal of Coastal Research*, **38** (6), 1207–1230. https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-22a-00010.1
- 243. Bukvic, A., A. Smith, and A. Zhang, 2015: Evaluating drivers of coastal relocation in Hurricane Sandy affected communities. International Journal of Disaster Risk Reduction, 13, 215–228. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.06.008
- 244. Lubell, M., 2017: The Governance Gap: Climate Adaptation and Sea-Level Rise in the San Francisco Bay Area. University of California, Davis, 52 pp. https://environmentalpolicy.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk6866/files/2019-10/UC-Davis-Governance-Gap-Sea-Level-Rise-Final-Report.pdf
- 245. Craig, R.K., 2011: Public trust and public necessity defenses to takings liability for sea level rise responses on the gulf coast. *Journal of Land Use & Environmental Law*, **26** (2), 395–435. http://www.jstor.org/stable/42842970
- 246. Jones, S.C., T. Ruppert, E. Deady, H. Payne, J.S. Pippin, L.-Y. Huang, and J.M. Evans, 2019: Roads to nowhere in four states: State and local governments in the Atlantic southeast facing sea-level rise. *Columbia Journal of Environmental Law*, **44** (1), 67–136. https://doi.org/10.7916/cjel.v44i1.806
- 247. Mach, K.J. and A.R. Siders, 2021: Reframing strategic, managed retreat for transformative climate adaptation. Science, **372** (6548), 1294–1299. https://doi.org/10.1126/science.abh1894
- 248. Shi, L., 2020: Beyond flood risk reduction: How can green infrastructure advance both social justice and regional impact? Socio-Ecological Practice Research, **2** (4), 311–320. https://doi.org/10.1007/s42532-020-00065-0