

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDIO MARINO

LAURA GARCÍA DE LA FUENTE, FERNANDO GONZÁLEZ TABOADA
ARTURO COLINA VUELTA



CÁTEDRA
DE CAMBIO CLIMÁTICO
de la Universidad de Oviedo



Universidad de
Oviedo



Principado de
Asturias



Diseño e ilustración: Juan Hernaz

Bajo licencia CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) identifica el cambio climático, junto con la contaminación y la pérdida de biodiversidad, como uno de los tres grandes problemas ambientales que componen la triple crisis planetaria a la que en la actualidad se enfrentan nuestras sociedades. La dimensión global y transfronteriza de estos problemas, así como su interdependencia, se hace especialmente evidente al analizar el impacto del cambio climático en el medio marino.

EL PAISAJE COSTERO Y MARINO COMO ESCENARIO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La lámina que acompaña este texto parte de un paisaje costero que se prolonga hacia mar abierto sobre la plataforma continental para ilustrar los principales efectos del cambio climático en el medio marino. La composición se inspira en una zona templada, aunque los ecosistemas, formaciones e infraestructuras son comunes a otras zonas del planeta, al igual que los procesos y mecanismos de cambio que se detallan en los siguientes apartados. A lo largo de la línea de costa, partiendo del tramo de costa alta en el margen izquierdo, se produce una transición desde zonas poco habitadas hasta zonas ocupadas por asentamientos urbanos y áreas industriales.

Las formaciones y ecosistemas naturales incluyen acantilados sobre los que se elevan zonas de rasa costera, un estuario con vegetación de marisma, un sistema de dunas asociado a una playa de arena, y tramos de costa rocosa. Estas zonas son especialmente atractivas para el desarrollo de actividades de tipo lúdico como la observación de la naturaleza, así como para la pesca artesanal y recreativa. En fondos someros, las praderas de fanerógamas marinas y los bosques de algas ocupan los hábitats bentónicos, lo que favorece que la fauna, incluyendo la pesca, sea más abundante. Lejos de la costa, a mayor profundidad, la luz deja de alcanzar el fondo. Se produce una transición hacia zonas de fondos blandos y arrecifes en los que predominan animales que migran diariamente a profundidades más someras para alimentarse o que aprovechan los restos que caen desde las capas superiores.

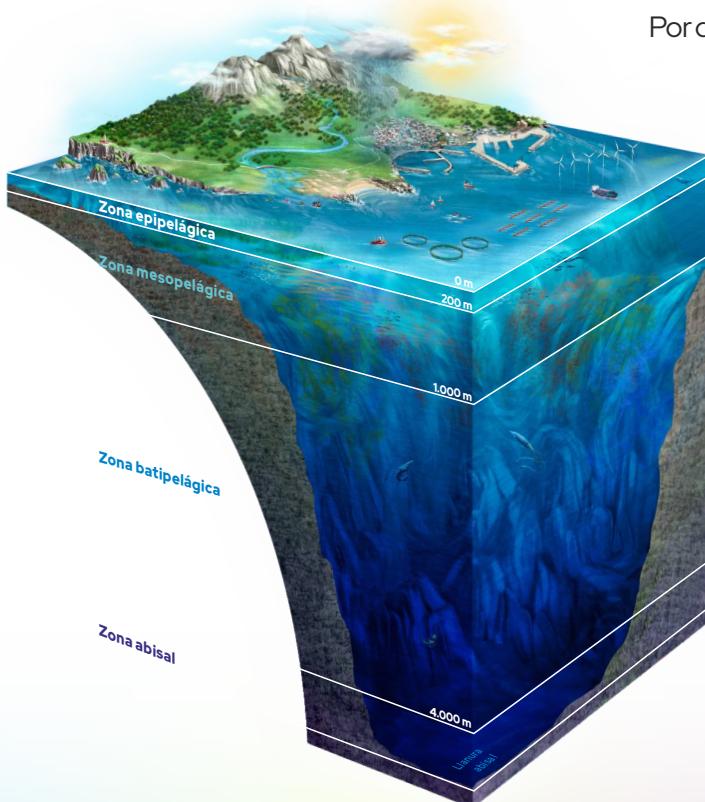
Las zonas alteradas incluyen una ciudad costera protegida del mar por un entramado de diques que sirve de abrigo para un pequeño puerto pesquero, y también para una zona residencial con una playa urbana. En el margen derecho se representa un puerto industrial alrededor del que se instalan complejos que se pueden beneficiar del transporte por mar de mercancías y pasajeros. El puerto sirve además de base para actividades en mar abierto dedicadas tanto a la obtención de alimento (bateas y jaulas de acuicultura, y barcos de pesca), como a la producción de energía (en el ejemplo, aerogeneradores y atenuadores en superficie para capturar energía undimotriz). La implantación, mantenimiento y el propio funcionamiento de este tipo de infraestructuras promueve la alteración del lecho marino y favorece la entrada de especies exóticas, procesos que reducen la biodiversidad.

ZONACIÓN VERTICAL DEL OCÉANO

El medio marino se estructura a lo largo del eje vertical en distintas zonas, tal y como muestra el recuadro en la parte izquierda de la lámina. Esta división responde a la extinción vertical de la radiación solar en el interior del océano y a la estratificación de la columna de agua de acuerdo al gradiente de densidad que, normalmente, depende de la temperatura, con masas de aguas más frías y densas a mayor profundidad.

La mayor parte de la actividad ocurre en la **zona epipelágica** (0-200 m de profundidad), la capa más superficial del océano, que juega un papel clave para entender el efecto del cambio climático en el mar. Es la única parte del océano en contacto directo con la atmósfera, y por donde penetra la radiación solar, directa e indirecta que absorbe océano. También es la zona en la que crece el fitoplancton, un conjunto de organismos microscópicos capaces de realizar la fotosíntesis y que juegan un papel similar en el mar al que juegan las plantas en tierra.

A mayor profundidad aparece la **zona crepuscular o mesopelágica** (200-1000 m), donde se encuentran masas de aguas intermedias que se forman en las zonas subpolares y, dependiendo de la latitud, pueden llevar varias décadas hundidas. Es una zona oscura en la que no penetra suficiente luz como para que sea posible la fotosíntesis, aunque sí para que los animales se orienten. De hecho, en esta capa se produce la migración vertical diaria de organismos que ascienden durante la noche a alimentarse a las capas superiores, un proceso que acelera el hundimiento pasivo de la materia orgánica producida en la superficie transportándola hacia mayor profundidad.

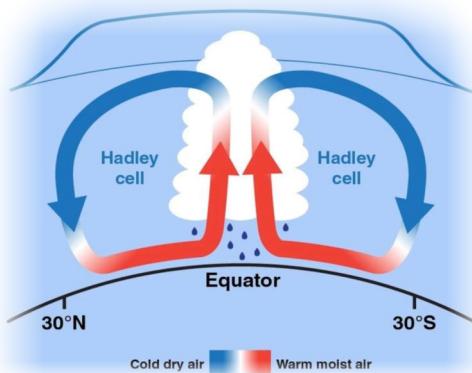


Por debajo de la zona crepuscular, hasta alcanzar el fondo, se encuentran la **zona batipelágica** (1000-4000 m) y la **zonal abisal** (>4000m), que comprenden tres cuartas partes del volumen del océano e incluyen las grandes llanuras abisales (con una profundidad media es 3800 m) que cubren el fondo de las principales cuencas oceánicas. Por debajo de 6000 m se distingue también una **zona hadal** que incluye las grandes fosas abisales. Todas ellas son zonas bañadas por masas de agua profundas que se forman en las regiones polares, por lo que su temperatura es extremadamente fría. Además, circulan lentamente y pueden transcurrir miles de años desde su formación por hundimiento hasta que vuelven a aflorar a la superficie en la zona de divergencia del océano sur, alrededor de la Antártida. Las condiciones de total oscuridad y las altas presiones exigen adaptaciones que resultan en formas de vida extravagantes, frágiles y únicas.

ALTERACIONES CAUSADAS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

El consumo de combustibles fósiles y los cambios de uso del suelo han alterado la composición química de la atmósfera, donde se acumula una parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂ (dióxido de carbono). El resultado es un aumento de la temperatura en superficie del planeta conocida como calentamiento global. Afortunadamente, la vegetación terrestre y los océanos han absorbido, año a año, y a partes iguales, alrededor de la mitad de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, lo que contribuye a retrasar el calentamiento global y el resto de los efectos del cambio climático.

Alrededor del 70 % de la superficie del planeta está cubierta por el océano, cuya capa superior intercambia materia, energía y momento con la atmósfera. El exceso de CO₂ y de calor en las capas bajas de la atmósfera produce un desequilibrio que el océano compensa parcialmente mediante una mayor absorción de carbono y un incremento de la temperatura en superficie. Estas aguas se acabarán mezclando y hundiendo, lo que contribuye a la ventilación de las capas superiores y a la propagación de la señal del cambio climático en profundidad.



Sobre estos procesos se superponen los cambios en la circulación atmosférica asociados al cambio climático, especialmente la expansión de las células de Hadley y el aumento en la intensidad de las tormentas, que afectan tanto la propia circulación del océano como su mezcla vertical.

A partir de estos procesos básicos, los efectos del cambio climático alteran otras variables físicas y químicas que amenazan la vida marina y afectan el funcionamiento de sus ecosistemas y, aunque los efectos más evidentes se producen cerca de la línea de costa y en aguas someras, la señal de cambio se detecta en las áreas más remotas en mar abierto y en las grandes profundidades oceánicas.

INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA Y MAYOR FRECUENCIA DE OLAS DE CALOR MARINAS

El océano está absorbiendo la práctica totalidad del exceso de radiación reemisita por efecto invernadero (un 93% entre 1971 y 2010). El resto de este exceso de energía ha contribuido a partes iguales a la pérdida de volumen y desaparición masas de hielo y al calentamiento de la superficie de los continentes, mientras que tan solo una centésima del exceso de calor se acumula en la atmósfera y es responsable del aumento de la temperatura y de que acumule más humedad.

Se da la aparente paradoja que los continentes se están calentando a un ritmo más rápido que la capa superficial del océano debido, en parte, al alto calor específico del agua (se requiere más energía para calentar un gramo de agua que un gramo de aire). No obstante, el océano es un

fluido en continuo movimiento, incluyendo la mezcla, hundimiento y afloramiento de aguas en la dirección vertical.

La continua renovación de las aguas en superficie tiene dos consecuencias. Por un lado, un aumento de la temperatura del mar en superficie implica que al menos se haya calentado un volumen de agua equivalente al de la capa de mezcla superficial, que mantiene una densidad homogénea por la acción de vientos y mareas. Por otra parte, la circulación vertical provoca que la señal de calentamiento penetre en profundidad. Aunque las capas superficiales han absorbido la mayor parte del calor, una tercera parte de la señal de calentamiento ha sido absorbida por el océano profundo (un 66 % en los primeros 700 m de la columna frente a un 27 % entre 700 y 2000 m y un 7 % por aguas más profundas entre 1901 y 2018).

Pese a la redistribución de calor en el interior del océano, la temperatura de la capa superficial del océano ha aumentado alrededor de 1°C, con una tendencia que ha ido acelerando hasta tasas de 0.13°C por década en los últimos años. En abril de 2024 los satélites registraron la temperatura más alta observada para el conjunto de los océanos, por encima de los 21°C. En el mar Cantábrico, la temperatura en superficie ha aumentado 0.30°C por década durante los últimos 43 años. Aunque este ritmo de calentamiento duplica la media global, queda lejos de las tasas alrededor de 1°C por década registradas en zonas más septentrionales, incluyendo el frágil ecosistema ártico.

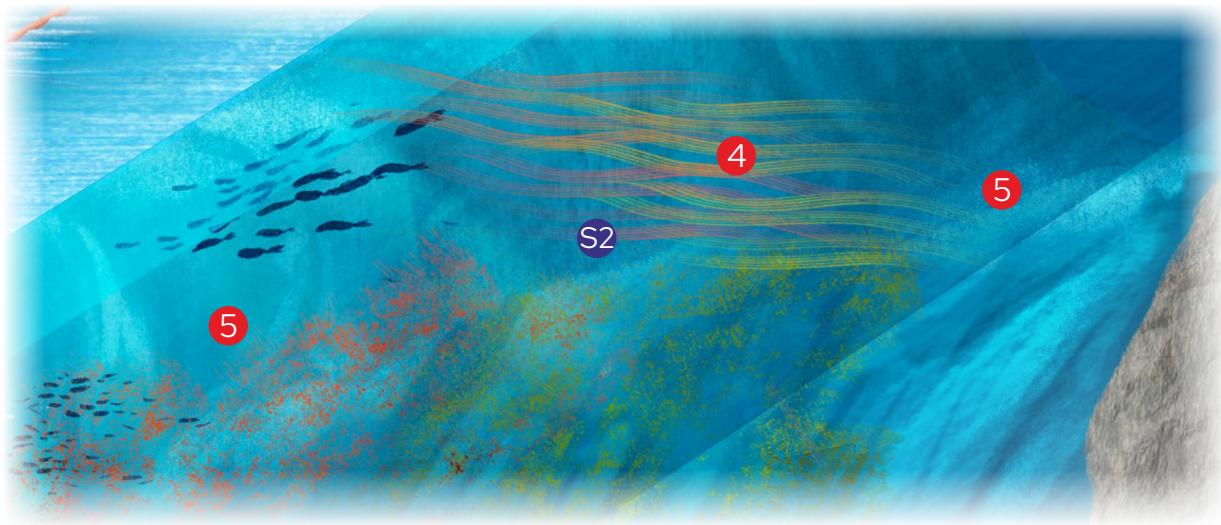
El aumento de la temperatura media se ve salpicado por olas de calor marinas, que en las costas europeas han alcanzado valores hasta 4°C por encima de la media. Aunque normalmente estas olas de calor se prolongan unos pocos días o semanas y afectan regiones poco extensas, cada vez son más frecuentes e intensas. El récord lo ostenta la mancha de agua caliente del Pacífico, una ola de calor marina que afectó la costa oeste del norte de América entre 2014 y 2016, y que llegó a extenderse sobre una superficie más de 2.5 millones de kilómetros cuadrados, equivalente a unas cinco veces la superficie de la península ibérica.

Las olas de calor marinas se producen en muchos casos a consecuencia de períodos extendidos de calma atmosférica sobre el océano. Este tipo de eventos son cada vez más comunes debido al cambio climático, especialmente en latitudes templadas. También contribuye la advección (desplazamiento horizontal) de aguas más calientes de lo normal hacia latitudes polares, normalmente a lo largo del margen este de las cuencas. Existen evidencias que el cambio climático ha contribuido a aumentar la frecuencia e intensidad de las olas de calor marinas, que se continuarán agravando en el futuro.

ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES BIOGEOQUÍMICAS (DESOXIGENACIÓN, ACIDIFICACIÓN Y CAMBIOS EN LA PRODUCCIÓN PRIMARIA)

El cambio climático está alterando de manera directa los ciclos biogeoquímicos en el océano, es decir, la concentración y los intercambios de materia entre los distintos compartimentos que componen los ecosistemas marinos. El aumento de la concentración de gases de efecto

invernadero en la atmósfera provoca, de manera directa, el calentamiento, desoxigenación y acidificación de las masas de agua. A esta triada se añade el descenso en la producción biológica, que comprometería tanto la captura de carbono como la provisión de alimentos. Las proyecciones disponibles apuntan que calentamiento, desoxigenación, acidificación y pérdida de productividad continuarán en el futuro, sobre todo si no se reducen cuanto antes las emisiones de gases de efecto invernadero.



Desoxigenación

El término desoxigenación se refiere a la disminución progresiva de la concentración de oxígeno disuelto en la columna de agua, principalmente como consecuencia del cambio climático. Entre 1960 y 2010, de acuerdo con las medidas disponibles, el océano ha perdido en conjunto un 2% de su oxígeno, principalmente en aguas por debajo de 1200 m. Es importante tener en cuenta que el océano solo gana oxígeno por intercambio de gases con la atmósfera o a través de la fotosíntesis, y que ambos procesos ocurren cerca de la superficie. Tras hundirse, las masas de agua intermedias y profundas, que representan más del 90% del volumen del océano, quedan aisladas y pierden oxígeno por la respiración de la materia orgánica. De manera natural, estos procesos llevan a la existencia de unas zonas de mínimo oxígeno a profundidades intermedias y en el margen este de las cuencas oceánicas que actualmente están en expansión.

En el contexto de cambio climático, hay tres mecanismos principales que promueven la desoxigenación. En primer lugar, el calentamiento aumenta la estratificación vertical del océano y reduce la mezcla vertical, además de promover la expansión hacia los polos de los giros subtropicales y de las zonas de afloramiento en superficie de las masas de agua intermedias y profundas. Ambos procesos alteran la circulación del océano, dificultando la ventilación de las capas superiores y ralentizando la circulación. El resultado es un aumento del tiempo de residencia de las aguas en el interior del océano que es el principal responsable de la disminución de oxígeno en el interior del océano (alrededor de un 85%).

A la vez, la solubilidad del oxígeno disminuye a medida que aumenta la temperatura. Para un aumento de 4°C a 6°C, el porcentaje de saturación de oxígeno en agua de mar disminuye un 5%. Este segundo mecanismo puede explicar en torno al 15 % de la disminución de oxígeno en el océano. Finalmente, aunque sujeto a más incertidumbre, el aumento de temperatura altera la actividad bacteriana y acelera las tasas de consumo de materia orgánica en el interior del océano, y por tanto también la respiración y consumo de oxígeno.

En un contexto de cambio global, otros procesos como la eutrofización cultural también contribuyen a la desoxigenación. Los vertidos de nutrientes inorgánicos a través de los ríos y de emisarios submarinos, favorecen la proliferación del fitoplancton. A medida que el plancton decrece y se hunde en profundidad, inyecta materia orgánica consumida por bacterias y otros organismos cuya respiración agota rápidamente el oxígeno disponible. El resultado son aguas sin vida en las que se acumulan compuestos como el ácido sulfídrico, letal para los animales y con un característico mal olor. Esta situación se agrava aún más cuando los vertidos contienen materia orgánica. Aunque se trata de un proceso de polución, el cambio climático afecta indirectamente favoreciendo que se produzcan estas condiciones.

Acidificación

La acidificación del océano describe un conjunto de cambios en la biogeoquímica del océano a consecuencia de la absorción de parte del exceso de CO₂ emitido a la atmósfera, y que se manifiestan principalmente en una tendencia hacia la disminución del pH del océano.

Cada año, los océanos absorben algo más de la cuarta parte del CO₂ que emitimos a la atmósfera, lo que contribuye a mitigar el impacto del cambio climático. La posterior mezcla o hundimiento hacia el océano profundo evita que esas aguas vuelvan a entrar en contacto con la atmósfera durante siglos. También existe una absorción y transporte a profundidad mediada por procesos biológicos, en la que intervienen tanto algas y plantas que habitan la zona litoral, como el plancton microscópico que flota cerca de la superficie de todo el océano. El transporte a profundidad implica la sedimentación de detritus, proceso facilitado por animales que se alimentan cerca la superficie, especialmente cuando migran a mayor profundidad de manera regular.

Al igual que ocurre con el oxígeno, al aumentar la temperatura disminuye la solubilidad del CO₂ en el agua de mar. No obstante, la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de manera notable en los últimos 175 años, desde 285 ppm (partes por millón) en 1850 a 425 ppm en 2025. Además, tras disolverse, el CO₂ se disocia rápidamente en iones carbonato y bicarbonato. Estos dos procesos contribuyen a que se mantenga el desequilibrio con la atmósfera y permiten que por el momento el océano continue absorbiendo CO₂.

La principal consecuencia de la absorción de parte del exceso de CO₂ atmosférico es que durante los últimos 200 años la acidez del océano se ha incrementado un 30 %. Este aumento de acidez no tiene precedente en la historia de la Tierra y amenaza la vida en el océano. El aumento de acidez altera varios procesos fisiológicos entre los que destaca la calcificación, clave para la

formación del esqueleto de corales y algas, moluscos y equinodermos. A la vez, el aumento de acidez parece favorecer el crecimiento de otras especies, por lo que en conjunto la acidificación promueve una reorganización de las redes tróficas marinas. Recientemente, se ha concluido que la acidificación es el séptimo límite planetario que se ha cruzado y, en un contexto más amplio, al considerar la interacción con otros procesos de cambio como el calentamiento, se ha propuesto que el blanqueamiento de los corales de los últimos años ha superado un punto de inflexión en el sistema climático.

Cambios en producción

El calentamiento del océano afecta de manera directa el funcionamiento de los ecosistemas marinos. Un primer efecto se produce a nivel fisiológico, ya que la mayoría de los organismos que habitan el océano están adaptados a un rango de temperatura relativamente estrecho y, además, muchos de ellos son poiquilotermos, es decir, incapaces de regular su temperatura corporal, que es igual al de las aguas que les rodean. Por esta razón, un aumento en la temperatura ambiente propicia cambios en la distribución de los organismos, tanto en el tiempo como en el espacio. Por ejemplo, desde 1950, se estima que el rango de distribución de las especies se ha desplazado siguiendo los cambios en temperatura a una velocidad promedio de unos 50 km por década para las especies que viven en la zona pelágica, y unos 30 km por década en el caso de las especies de fondo.

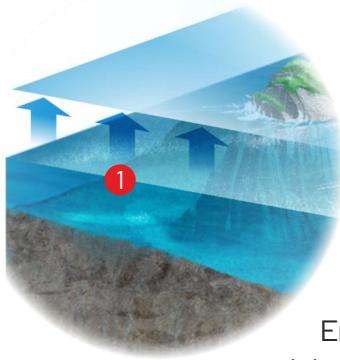
En zonas frías, el calentamiento puede ampliar la época de crecimiento y abrir nuevas oportunidades a medida que desaparecen hábitats previamente inaccesibles, como las zonas cubiertas por hielo. El resultado sería un aumento local de la producción, aunque con el coste asociado de pérdida de la biodiversidad y, en el caso concreto de la desaparición del hielo, con un efecto de retroalimentación por disminución del albedo. En zonas cálidas, el calentamiento suele producir el efecto contrario, empujando a parte del sistema al colapso.

Además de actuar como factor de estrés, dentro del rango de tolerancia, la temperatura acelera todas las reacciones bioquímicas y funciones biológicas. Dicha aceleración no afecta por igual todos los procesos biológicos, sino que tiende a aumentar los costes de mantenimiento fisiológico por encima de los beneficios sobre la producción, adquisición de energía y acumulación de biomasa. A medio plazo, el resultado es una sustitución progresiva de especies que, en términos relativos, se caracterizan por tener un tamaño grande y un ciclo de vida lento, frente a especies de un tamaño menor y ciclo de vida rápido.

El segundo efecto general del calentamiento sobre la producción de los ecosistemas pelágicos es indirecto, pero actúa sobre la propia base del sistema. Como se discute de manera más amplia en otros apartados, el calentamiento altera la circulación, reduce la mezcla vertical y aumenta la estratificación, con el efecto neto de reducir la ventilación de las capas menos profundas del océano. La ventilación permite la renovación de las masas de agua en superficie, devolviendo aguas que pueden llevar cientos de años en profundidad y en las que la práctica totalidad de la materia orgánica se ha oxidado a compuestos inorgánicos que sirven de nutriente en la superficie.

La luz solar penetra únicamente en la capa superior del océano, donde se produce la mayor parte de la producción primaria por parte de algas microscópicas que flotan cerca de la superficie. Estas algas son capaces de sintetizar materia orgánica a partir de dióxido de carbono y nutrientes inorgánicos mediante fotosíntesis, de manera similar a como lo hacen las plantas en tierra y contribuyendo a mitigar el impacto del cambio climático. Al igual que en tierra, el exceso de dióxido de carbono también estimula el crecimiento de algunos grupos de algas (especialmente los cocolitofóridos), aunque la respuesta general al calentamiento y a la acificación es negativa. La principal diferencia es que la provisión de nuevos nutrientes depende, salvo cerca de la costa o en áreas con fuerte deposición atmosférica, de la renovación de las masas de agua. No obstante, los efectos del cambio climático sobre la producción primaria solo están comenzando a ser detectables en la actualidad, dejando margen para evitar mayores impactos si se reducen las emisiones. Las proyecciones disponibles sugieren una disminución progresiva de la producción primaria que se propagaría a niveles tróficos superiores, incluyendo la pesca. Se proyecta que la caída en la producción sería más intensa y ocurriría antes en escenarios con más emisiones.

AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR



El aumento del nivel del mar es una consecuencia directa del efecto del cambio climático sobre el volumen de agua en el océano. Dicho aumento responde a su vez tanto a un aumento de masa como a una disminución de la densidad, que constituyen las componentes eustática y estérica del aumento del nivel del mar, respectivamente.

En el caso de la componente eustática, el principal mecanismo responsable del aumento de la masa de agua en los océanos es la progresiva desaparición de las masas de hielo continental o *inlandis* y la menor acumulación de agua en los continentes a medida que aumenta la temperatura en la superficie del planeta. La principal contribución procede del deshielo de los casquetes polares de Groenlandia y la Antártida, aunque se trata de un proceso que afecta a todos los glaciares del planeta, especialmente en Sudamérica. En conjunto, la componente eustática explica un 60% del aumento observado en el nivel del mar a escala global. La componente estérica se refiere a la dilatación del agua de mar como consecuencia directa del incremento de su temperatura, y es responsable del 40% restante.

El último informe del IPCC [AR6] concluye que el nivel medio del mar aumentó medio de 20 cm entre 1901 y 2018. Sin embargo, también destaca que el ritmo de aumento se acelera año tras año. Desde 1993 los cambios en el nivel global del mar se pueden medir con gran precisión gracias a una constelación de satélites oceanográficos equipados con altímetros. Estos datos revelan una tendencia de aumento del nivel medio del mar de 3.3 mm año^{-1} a escala global entre 1993 y 2024, con una aceleración de $0.077 \text{ mm año}^{-2}$. Tal ritmo corresponde a un aumento acumulado de 11 cm. Además, la tasa de aumento anual se ha duplicado, pasando de 2.1 mm año^{-1} en 1993 a 4.5 mm año^{-1} en 2024. En la costa atlántica europea los valores son similares y, de acuerdo con las estimaciones realizadas por el servicio Copernicus, para el mar de Irlanda y el golfo de Vizcaya se sitúa alrededor de 4.9 mm año^{-1} para el período 1994-2024, lo que representa una aceleración de 0.32 mm año^{-2} .

Los cambios en el nivel medio del mar pueden parecer a primera vista modestos y, desde luego, son difíciles de cuantificar. No obstante, al igual que al considerar otros aspectos del cambio climático, se trata de tendencias graduales que alteran de manera progresiva el estado del sistema y que se añaden a la variabilidad de fondo. En el caso del aumento del nivel del mar, sus efectos se vuelven evidentes al considerar su contribución a agravar los efectos indeseados de fenómenos extremos.

EFFECTOS INDIRECTOS A ESCALA REGIONAL Y LOCAL

INCREMENTO DE LA EROSIÓN COSTERA (PLAYAS, DUNAS Y ACANTILADOS)

La erosión costera es el proceso de desplazamiento de la línea de costa tierra adentro a consecuencia de la acción del mar. El impacto repetido y la presión del oleaje, las mareas, las corrientes marinas y el viento, junto con la abrasión y el transporte de sedimentos, son los principales agentes geomorfológicos que contribuyen a la erosión costera. Además, es importante tener en cuenta que las tormentas potencian la acción de estos agentes y aumentan extraordinariamente la erosión. Otros procesos como la sequía o la infiltración de agua marina pueden aumentar la inestabilidad de las formaciones costeras y facilitar que ocurran deslizamientos.

En general, el cambio climático tiende a acelerar la tasa de erosión costera, comenzando por la inundación paulatina de nuevas áreas a consecuencia de la subida del nivel del mar. Este mecanismo afecta principalmente las zonas de costa baja, incluyendo playas de arena y sistemas de dunas. También se está produciendo un aumento de la altura y energía del oleaje a escala mundial en paralelo al aumento de la magnitud de los vientos oceánicos extremos. El aumento de temperatura contribuye de manera directa a aumentar la frecuencia e intensidad de las tormentas, tanto al incrementar la cantidad de humedad que puede contener el aire como al actuar como una fuente de energía que refuerza los sistemas de borrascas.

El cambio climático también está promoviendo cambios en los patrones de precipitación que en latitudes templadas provocan tanto sequías más prolongadas como lluvias más intensas. Ambos factores se alinean y precondicionan el terreno para una mayor erosión. En el otro lado de la balanza, la acreción por el aumento de la descarga de sedimentos en los ríos tras las tormentas, o alteraciones locales de la circulación costera, pueden llevar a un efecto contrario del cambio climático sobre la erosión costera.

Sin embargo, análisis recientes de imágenes tomadas por satélites entre 1984 y 2015 estiman que la erosión costera ha resultado en la desaparición de 28000 km² de costa en todo el mundo, un valor que duplica la tierra ganada al mar durante el mismo período. Las proyecciones



disponibles sugieren que la tasa de erosión costera continuará aumento en el futuro salvo que se reduzcan de manera rápida las emisiones de gases de efecto invernadero. De hecho, bajo escenarios de altas emisiones, los modelos predicen la desaparición de la mitad de las playas de arena del planeta.

INCREMENTO DE LOS FENÓMENOS EXTREMOS (INUNDACIONES COSTERAS, TEMPORALES/VENDAVALES Y TORMENTAS)

Una consecuencia directa de la subida del nivel del mar sobre el riesgo de inundación es un aumento de los niveles extremos que alcanzan las aguas cuando se alinean condiciones desfavorables de la oscilación de marea, oleaje fuerte o marejada ciclónica (elevación del nivel al disminuir la presión atmosférica). En zonas cercanas a la desembocadura de ríos, incluyendo estuarios, se da el riesgo adicional de inundación fluvial. Además, la morfología costera local y los patrones de erosión pueden agravar aún más este tipo de fenómenos.

Tanto el análisis de series históricas de nivel del mar registradas por mareómetros, como de los datos acumulados por caudalímetros y pluviómetros, atestiguan un aumento en la frecuencia con que se superan los valores umbrales que definen de extremos de altura y volumen asociados al riesgo de inundación. Estos registros reflejan en parte el aumento en la intensidad y frecuencia de tormentas, en particular de los ciclones tropicales.

A medida que la superficie de la Tierra, y en particular el océano, acumulan más calor, se estimula la evaporación y la acumulación de vapor de agua en la atmósfera, precursores de grandes tormentas con vientos peligrosos y descargas de precipitación que pueden causar inundaciones. Se trata de una respuesta no lineal. Las proyecciones del IPCC sugieren que bajo un escenario de calentamiento global por encima de 4°C, la frecuencia de eventos extremos de precipitación con un período de retorno de 10 años se duplicaría [ocurriría cada 5 años], mientras que la frecuencia se triplicaría para los eventos con un período de 50 años.

ESTRATIFICACIÓN, CAMBIOS DE CIRCULACIÓN (CORRIENTES) Y EN EL AFLORAMIENTO (MERMA DEL INTERCAMBIO DE AGUAS)



A consecuencia del calentamiento la temperatura de las capas superficiales está aumentando a un ritmo más rápido que la temperatura de las capas a mayor profundidad. La fusión de los casquetes polares y glaciares, y la menor retención de agua en las masas continentales acaba vertiendo agua dulce con una salinidad muy baja.

Tanto el calentamiento como la menor salinidad resultan en una mayor flotabilidad de las masas de agua en la superficie del océano. Visto de otro modo, el cambio climático favorece un

aumento de las diferencias en densidad a lo largo de la columna de la columna. De esta manera, aumenta la estratificación del océano, haciendo cada vez más difícil la mezcla vertical de las aguas. Las estimas disponibles sugieren un incremento del 5.3 % en la estratificación entre la superficie y 2000 m durante el período 1960-2018. Este aumento se debe principalmente al aumento de temperatura de las capas superiores. Las predicciones sugieren que estas tendencias continuarán en el futuro.

Una mayor estratificación puede limitar la capacidad del océano para continuar absorbiendo el calor acumulado a consecuencia del cambio climático. La estratificación afecta la circulación vertical y ralentiza la mezcla y ventilación de las capas superiores, impidiendo tanto que penetre oxígeno en las capas profundas y aisladas de la superficie, como el retorno de los nutrientes reciclados en profundidad hasta la superficie, donde son necesarios para mantener la producción primaria.

Además de estos cambios, también se espera un aumento del afloramiento costero, debido principalmente a que el cambio climático amplifica los gradientes de presión entre las masas continentales y el océano. En los márgenes este de las grandes cuencas oceánicas, estos sistemas de presión mantienen sistemas de vientos costeros paralelos a la costa que arrastran las aguas superficiales mar adentro. Estas aguas son sustituidas por aguas profundas frías y ricas en nutrientes.

Las grandes zonas de afloramiento son algunos de los ecosistemas más productivos del mundo, que sostienen pesquerías como la anchoveta en la corriente de Humboldt, o las grandes pesquerías en California, Agujas o Canarias. Pese a que la intensificación de estas corrientes podría tener a priori consecuencias positivas, se valoran escenarios de colapso debido al exceso de producción y desoxigenación de las aguas de fondo, o a la ascensión de aguas corrosivas por exceso de acidez. Se han documentado episodios recientes de mortandad y surgencia tanto de aguas anóxicas como ácidas. El balance no está claro, ya que la interacción con la estratificación podría incluso invertir la tendencia y reducir el afloramiento.

EL MARCO CONCEPTUAL DE LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS PARA EL BIENESTAR HUMANO

Los **servicios de los ecosistemas** (o servicios ecosistémicos, en adelante SE) son los recursos y procesos suministrados por los ecosistemas que proporcionan beneficios a las sociedades humanas (de manera consciente o inconsciente), y que contribuyen a hacer que la vida sea posible y que ésta merezca la pena. En una excepcional frase, ya a finales de la década de los años 90 del siglo pasado, la ecóloga norteamericana Gretchen C. Daily resumió esencialmente este mismo concepto, al decir que “*Todos, como individuos y sociedad, dependemos por completo de la Naturaleza para casi todos los aspectos de nuestra supervivencia, nuestro bienestar y nuestra felicidad*”.

Desde un punto de vista más formal, este enfoque diferencia varios conceptos clave. Por un lado, los distintos ecosistemas del planeta (entre ellos, los marinos) y su biodiversidad conforman el

denominado **capital natural**, cuya estructura, funcionamiento ecológico y conectividad con otros ecosistemas determinan sus cualidades (integridad, resiliencia, etc.). A partir de ahí, las **funciones** de los ecosistemas consisten en procesos físicos, químicos o biológicos, o simplemente en determinadas características, que contribuyen a su propio mantenimiento. Como resultado de estas funciones, los ecosistemas producen beneficios para el medio ambiente en general, pero también para las personas en particular, en la medida en que se aprovechen de ellos. Es decir, los ecosistemas tienen capacidad de **generar servicios a partir de las funciones** (valor instrumental para el bienestar humano).

Aunque la manera de agrupar y clasificar los servicios ecosistémicos puede variar ligeramente según el marco internacional de referencia, en general se distinguen cuatro grandes **tipologías**: servicios de abastecimiento o provisión, de regulación, de información o culturales, y de soporte (algunas clasificaciones internacionales los consideran dentro de los servicios de regulación).

Para que una función de un ecosistema preste un **servicio al ser humano** debe producirse cierto grado de interacción o al menos algún tipo de apreciación del ecosistema por parte de las personas. Como resultado de ello, **la sociedad convierte la mayoría de las funciones naturales en servicios aprovechados en beneficio propio que contribuyen a nuestro bienestar**. Sin embargo, esta capacidad está condicionada por las presiones antrópicas, las condiciones del propio ecosistema (calidad y atributos estructurales y funcionales) y otros elementos como el cambio climático. Para que el sistema socio-ecológico sea sostenible, y se siga generando dicho flujo de servicios, se debe conservar este capital natural (ecosistemas resilientes).

¿QUÉ SERVICIOS OBTENEMOS DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS?

El mar es uno de los ecosistemas más productivos del planeta y proporciona un sinfín de servicios que el ser humano aprovecha en beneficio propio y para su bienestar. Ello no solo se debe a su extensión (más de dos tercios de la Tierra están ocupados por mares y océanos), sino a que los ecosistemas marinos comprenden una gran variedad de ambientes condicionados por variables físicas (profundidad, presión, temperatura, luz), químicas (salinidad, oxígeno) y geológicas (tipos de sustratos). Estos ecosistemas abarcan desde las zonas costeras y litorales, hasta el lecho marino profundo, y contienen hábitats muy diversos: praderas submarinas, calas y bahías de fondo arenoso poco profundo, arrecifes, estuarios y acantilados, etc.

Los ecosistemas marinos proporcionan:

SE de abastecimiento: contribuciones directas al bienestar humano procedentes de su estructura biótica y geótica. Los ecosistemas marinos nos dan alimentos (pescado, algas, marisco, etc. procedentes de la pesca, la acuicultura, el marisqueo y la recolección), materias primas (sal, agua salada, conchas o arena), energía renovable (eólica, maremotriz, undimotriz o biocombustibles) y un espacio físico para moverse (navegación y transporte y asentar la población y actividades humanas (ciudades costeras, puertos, muelles y astilleros, infraestructuras de comunicación, salinas, faros, etc.).



SE de regulación: contribuciones indirectas al bienestar humano procedentes del funcionamiento del propio ecosistema marino. Los servicios de regulación del mar son de una importancia fundamental, destacando por ejemplo la asimilación y depuración de los vertidos de aguas residuales (oxigenación gracias al oleaje, biorremediación), sumidero de gases de efecto invernadero y producción de oxígeno (por las algas y resto de organismos marinos), la regulación favorable del clima local (confort térmico por la brisa marítima, suavizado de temperaturas estivales e invernales respecto a zonas de interior), la regulación morosedimentaria e hidrodinámica litoral y de alta mar (formación de playas, corrientes marinas), y la protección frente a perturbaciones y eventos extremos (prevención de la erosión costera gracias a las dunas y arrecifes).

SE culturales: contribuciones intangibles (estéticas, sensoriales, religiosas, espirituales) que las personas obtenemos a través de la experiencia directa y el contacto con el mar y su biodiversidad. En el caso de los ecosistemas marinos, estos servicios adquieren una dimensión excepcionalmente rica y relevante, destacando los relacionados con la práctica de actividades recreativas y de disfrute estético (playas; rutas costeras y paseos marítimos; deportes marítimos (náutica, buceo, surf, traineras); marisqueo en pedreros y pesca recreativa; etc.) y con el patrimonio cultural marítimo y pesquero (gastronomía y prácticas culinarias en torno a los productos del mar; edificios singulares como ermitas marítimas, museos, rulas, atarazanas; fiestas y tradiciones marineras; oficios y profesiones ligadas al mar y la pesca; leyendas, cuentos, mitología y expresiones artísticas; conocimiento ecológico local de los pescadores; formas de asociación, sentimiento de pertenencia, e identidad cultural de los pueblos marítimos; educación ambiental e investigación científica; etc.).

SE de soporte: son procesos naturales fundamentales, ya que sostienen el funcionamiento de los ecosistemas y permiten que existan los otros SE (provisión, regulación y culturales), aunque no proporcionan beneficios directos e inmediatos a los humanos. En los ecosistemas marinos destacan los ciclos de nutrientes (reciclado y transformación de nutrientes esenciales como N, P y C), los procesos biogeoquímicos y de producción primaria (transporte de calor por las corrientes oceánicas, absorción de CO₂; fotosíntesis realizada por algas y fitoplancton, etc.) y la formación de hábitats para las especies y biodiversidad marina (arrecifes de coral praderas marinas, marismas, cañones abisales y cuevas submarinas, etc.).

¿CÓMO AFECTA EL CAMBIO CLIMÁTICO AL BIENESTAR QUE OBTENEMOS DEL MAR?

En el último siglo, las funciones que realizan los ecosistemas marinos se han alterado y degradado gravemente debido principalmente a las presiones humanas (contaminación, sobre pesca, alteración de la costa, etc.) que han empeorado las condiciones en que se encuentran nuestras costas, mares y océanos. El cambio climático es otro gran motor de degradación con una importancia creciente desde hace décadas, especialmente por sus sinergias negativas con el resto de factores de declive.

Bajo una visión ecosistémica, los impactos del cambio climático en el bienestar humano proceden de la menor capacidad de los ecosistemas marinos para realizar muchas de sus funciones a causa de las **alteraciones climáticas**, lo que a su vez se traduce en perjuicios, mermas o empeoramientos en los servicios que aprovecha o de los que se beneficia el ser humano. Las alteraciones causadas por el cambio climático en los ecosistemas marinos a menudo acaban impactando a más de un servicio y a varias de las dimensiones del bienestar humano (seguridad, salud, buenas relaciones sociales, libertad de elección, cobertura de las necesidades nutricionales, etc.).

Las alteraciones del cambio climático en los ecosistemas marinos dañan de manera generalizada los **servicios de soporte**, con consecuencias en cadena sobre el resto de servicios: disminución o desaparición de hábitats (S1) (p. ej. praderas de algas) y de ecosistemas costeros y litorales (playas, dunas, marismas); cambios en la distribución de las especies y pérdida de biodiversidad (S2) (p. ej. comunidades de macroalgas, aparición de especies invasoras y exóticas); alteración de procesos biogeoquímicos y de producción primaria (S3) (p. ej. menor disponibilidad de oxígeno, reducción de los niveles de fitoplancton).

Se identifican otros dos grandes tipos de impactos sobre los **servicios de abastecimiento**. En primer lugar, el aumento del nivel del mar, la erosión costera y la agudización de fenómenos extremos como temporales costeros, tormentas o inundaciones incrementarán el riesgo para las personas y los bienes en los espacios donde se ubican actividades y asentamientos humanos (A1). En segundo lugar, es esperable una reducción de la productividad pesquera (A2), en particular de la actividad extractiva debida a la subida de las aguas (que afectará, por ejemplo, a los recursos intermareales y objeto del marisqueo) y al resto de alteraciones biogeoquímicas, térmicas, de circulación y afloramiento de las aguas (p. ej. especies pesqueras que cambiarán su ámbito de distribución hacia aguas más profundas o más al norte).

El cambio climático redundará también en un empeoramiento de los **servicios de regulación** que nos presta el mar. La subida del nivel de las aguas, junto al incremento de fenómenos extremos y de circulación de las corrientes marinas va a alterar la capacidad de asimilación y depuración de residuos del mar (R1) (p. ej., episodios de arribazón de basuras marinas y residuos urbanos en playas). El calentamiento del mar, los cambios de circulación de las corrientes y la mayor concurrencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos van a empeorar la benevolencia típica del clima costero (R2). La subida del nivel de las aguas y el incremento de los procesos erosivos sobre dunas, acantilados y playas redundará en una mayor desprotección del litoral frente a perturbaciones y eventos extremos (R3) (p. ej. mayores daños en infraestructuras marítimas y portuarias, reducción del valor del suelo e inmuebles altamente expuestos al frente costero, etc.).

Finalmente, los **servicios culturales** se verán impactados al reducirse las posibilidades de esparcimiento (C1) como consecuencia de la reducción/desaparición de ecosistemas y especies (p. ej., deterioro de playas y arenales, desaparición de especies tradicionalmente objeto del marisqueo y la pesca recreativa, aparición de especies invasoras/exóticas que afecta negativamente a las actividades turísticas, el baño y el ocio marítimo, etc.). También se

incrementará el riesgo para personas y bienes en espacios donde se ubican actividades recreativas y culturales (C2) (p. ej. mayores riesgos de la pesca recreativa y el ocio en muelles, dársenas, paseos marítimos; deterioro de equipamientos culturales como museos, lonjas, cofradías de pescadores; etc.).

¿PODEMOS HACER ALGO PARA MINIMIZAR ESTOS IMPACTOS?

Las respuestas, materializadas en actuaciones y políticas marinas y costeras, pueden ir orientadas a recuperar/restaurar la capacidad de los ecosistemas marinos para darnos servicios, es decir, actuar para reducir las presiones que les restan funcionalidad y mejorar sus condiciones; ello tendrá, luego, un reflejo más o menos directo y dilatado en el tiempo sobre los diversos servicios al ser humano. Se trata de las denominadas **medidas de mitigación**, que se centran en recuperar el capital natural marino que está deteriorando el cambio climático (entre otros desencadenantes) y que es necesario para mantener el bienestar humano. Destacan, entre otras, las medidas de reducción de las emisiones de la navegación marítima, recreativa y pesquera (p. ej. motores más eficientes y menos contaminantes, buques eléctricos y propulsados por energías renovables y no contaminantes), las actuaciones de recuperación y restauración de ecosistemas marinos y costeros (praderas de macroalgas, playas, dunas, marismas) y la promoción de las formas de pesca mejor alineadas con la conservación de los recursos marinos (pesca artesanal y costera sostenible, conservación y fomento de prácticas de

pesca y marisqueo tradicionales). Además, el mar también puede contribuir a la reducción general de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen energético al ser el medio capaz de albergar fuentes renovables como la energía maremotriz, undimotriz y eólica marina (medida general de mitigación del cambio climático).



Otras respuestas necesarias son las que buscan reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y actividades costeras ante los efectos del cambio climático, para hacerlos más resilientes y mejor preparados ante los cambios esperados. Se trata de las denominadas medidas de adaptación. Podemos citar algunas, como por ejemplo la protección de zonas costeras (evitando su urbanización urbanizaciones, regulando los usos construyendo infraestructuras verdes que evitan la degradación de sistemas dunares, estuarinos, arrecifes, etc.), la alerta temprana de fenómenos climatológicos extremos a zonas costeras pobladas, los sistemas de vigilancia marítima de especies invasoras, la declaración de áreas marinas protegidas, la gestión adaptativa de la pesca extractiva, etc.