

**La exploración  
de la biodiversidad marina**  
**Desafíos científicos  
y tecnológicos**

**Carlos M. Duarte (ed.)**

---

Separata del capítulo

**4. LA VIDA EN SUSPENSIÓN: EL PLANCTON**

por

**Geoff A. Boxshall**  
Museo de Historia Natural, Londres, Reino Unido

© Fundación BBVA, 2006

[www.fbbva.es](http://www.fbbva.es)

ISBN: 978-84-96515-26-0



#### 4.1. INTRODUCCIÓN

LA TIERRA ES UN PLANETA DE AGUA: los océanos cubren el 71% de su superficie. Tal vez hubiera sido más adecuado que se llamara el Planeta Azul. La zona pelágica del océano abierto, lejos del fondo marino y del litoral, es el mayor hábitat del planeta y abarca una extensión aproximada de 1.347 millones de km<sup>3</sup>. En este enorme volumen habita una comunidad muy diversa de microorganismos y metazoos: el plancton. El término plancton deriva de la palabra griega utilizada para «errante» y se utiliza para referirse a una comunidad de organismos transportados por las corrientes oceánicas y las masas de agua. Los animales planctónicos tienen capacidad para nadar, pero, debido a su tamaño generalmente pequeño, no pueden nadar lo suficientemente rápido ni lo bastante lejos como para moverse con autonomía en la masa de agua en la que se encuentran. Existen algunas especies de plancton de mayor tamaño, como colonias de taliáceos del género *Pyrosoma*, que pueden llegar a medir 4 metros en aguas tropicales, y medusas como la recientemente descubierta gran medusa roja, *Tiburonia granrojo*. Con todo, se trata de excepciones que ni a pesar de su gran tamaño son capaces de moverse con autonomía contra el flujo de las masas de agua.

En la columna de agua pelágica habita una comunidad diversa y dinámica en la que podemos encontrar organismos holoplanctónicos (aquellos que completan la totalidad de su ciclo de vida en el plancton) y organismos meroplanctónicos (los que sólo son planctónicos durante una parte de sus vidas). El meroplancton se compone principalmente de formas larvarias, y su composición varía considerablemente según la estación, especialmente en latitudes templadas. Las larvas meroplanctónicas maduran y se transforman en necton (conjunto de organismos capaces de nadar contra el flujo de las masas de agua, como, por ejemplo, algunas larvas de peces), o en organismos bentónicos (los que viven en el fondo marino, como, por ejemplo, larvas de equinodermos o de moluscos bivalvos). La distribución de los organismos del plancton no es uniforme en el tiempo ni en el espacio. Esta característica complica el estudio de la dinámica del plancton, ya que la detección de cambios en el tiempo exige análisis estadísticos rigurosos capaces de identificar tendencias frente a la variabilidad debida a una distribución horizontal o vertical desigual.

◀ **Foto 4.1: Ballena azul (*Balaenoptera musculus*).** Este cetáceo, el mayor animal que jamás haya existido en los mares, se alimenta exclusivamente de plancton, en especial de krill.



**Foto 4.2: Krill antártico (*Euphasia superba*).** Estos pequeños crustáceos planctónicos constituyen la base de la cadena alimentaria en los ecosistemas antárticos.

Los sistemas planctónicos dependen en buena parte de la captación de la energía solar a través de la fotosíntesis en las aguas superficiales, donde los niveles de luz son adecuados. La producción primaria, tanto la de las algas eucarióticas como la de bacterias fotosintéticas, también puede depender de la cantidad de nutrientes: la reducida disponibilidad de nutrientes podría llegar a limitarla, incluso en aguas bien iluminadas. Los patrones de movimiento de los océanos, la estratificación de la columna de agua y los movimientos ascendentes de agua pueden tener todos importantes efectos. La mayor parte del plancton se halla en aguas próximas a la superficie, pero también puede encontrarse en cualquier punto de la columna de agua y alcanzar las fosas oceánicas más profundas. Por debajo del nivel de profundidad donde cesa la producción primaria neta, los organismos del plancton aprovechan la «nieve marina» (materia orgánica que desciende desde las capas más superficiales de la columna de agua). El flujo de materia hacia el fondo marino sigue un patrón estacional en las zonas templadas, y en el hemisferio norte se ha detectado un impulso diferenciado de este material, que se dirige a la zona abisal coincidiendo con la llegada de la primavera. Así pues, los cambios que tienen lugar en la superficie pueden afectar a los procesos que se producen en las aguas profundas en periodos relativamente cortos.

## 4.2. PUNTOS CLAVE

Los desafíos científicos y técnicos que deben afrontar los investigadores que trabajan en el estudio del plancton son, en esencia, los mismos a los que se enfrenta la biología marina en su conjunto. Los tres fundamentales son:

- Descubrir: hallar nuevas formas de vida desconocidas y estudiar nuevos hábitats, a fin de identificar áreas de importancia concreta.
- Comprender: observar y llevar a cabo experimentos en todas las escalas temporales y espaciales.
- Predecir: desarrollar modelos que nos permitan identificar futuros cambios de los sistemas marinos en respuesta a un cambio ambiental, natural o antropogénico.

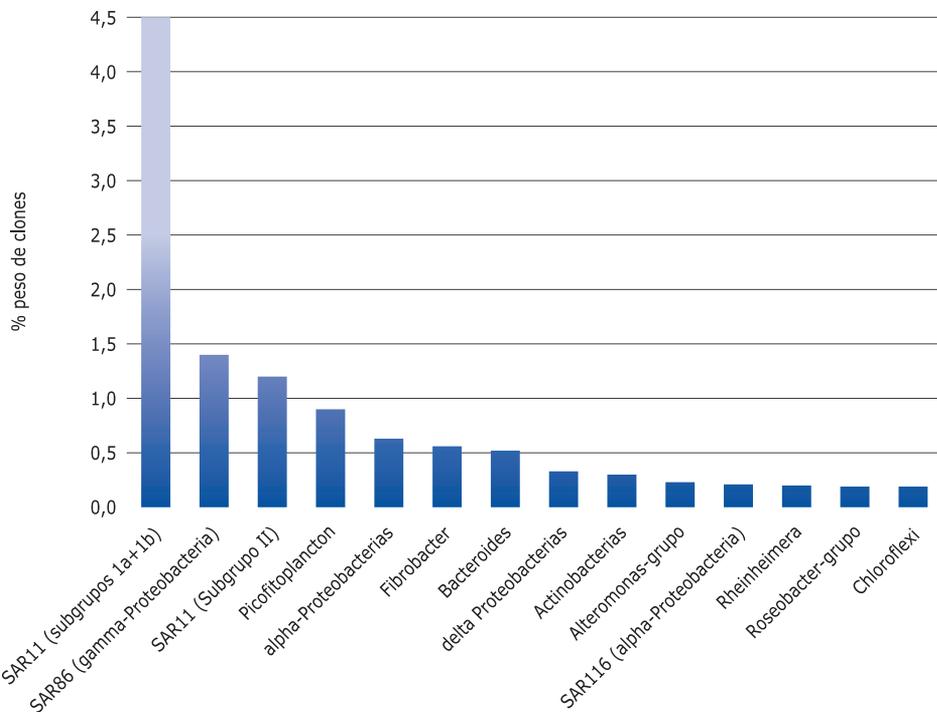
Todos estos desafíos obligan a enfrentarse a problemas de envergadura, especialmente la necesidad de integración de los datos a escalas ultrapequeñas –como los procedentes de la biología molecular– con los datos a gran escala obtenidos de observaciones terrestres con satélites. Además es preciso poder generalizar en las diferentes escalas, integrando desde observaciones de organismos individuales o poblaciones locales hasta procesos de la cuenca oceánica o de escala global.

### 4.2.1. Descubrir

En el año 2004, Craig Venter y sus colaboradores utilizaron técnicas de secuenciación aleatoria para estudiar los genes presentes en una muestra de agua del mar de los Sargazos, y hallaron 1.214.207 nuevos genes y cerca de 1.800 nuevas especies de organismos microbianos (gráfico 4.1).

Hallazgos de este tipo nos indican que todavía queda cerca del 99% de la diversidad de vida en los océanos por conocer y que la mayor parte de estos organismos son microbianos.

El descubrimiento de nuevos microorganismos marinos no está limitado únicamente a las capas superficiales del agua. Las bacterias verdes del azufre son organismos anaerobios (organismos que crecen y se reproducen en ausencia de oxígeno molecular) capaces de oxidar compuestos de azufre en presencia de luz, para posteriormente reducir el  $\text{CO}_2$  y obtener el carbono orgánico necesario para su crecimiento. Asimismo, también tienen capacidad para realizar la fotosíntesis y crecer en condiciones mínimas de luz. Recientemente se han descrito nuevas especies de bacterias verdes del azufre en muestras de fuentes hidrotermales submarinas donde la única fuente de luz son las radiaciones geotérmicas, las cuales contienen longitudes de onda que pueden ser absorbidas por los pigmentos fotosintéticos de estos organismos.

**Gráfico 4.1: Diversidad bacteriana del mar de los Sargazos**

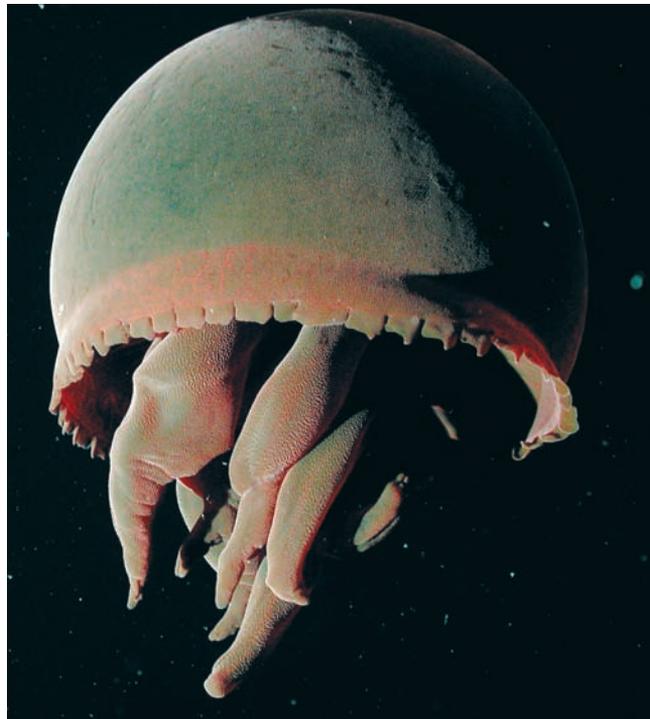
Fuente: Venter et al., 2004.

Más pequeños aún que las bacterias son los virus marinos. Los virus son tan sumamente abundantes en el plancton, que se cree que constituyen el segundo componente más importante de la biomasa oceánica, por detrás de las bacterias. En las aguas cercanas al litoral habrá unos  $10^7$  virus por mililitro de agua, aunque esta cifra disminuye progresivamente a medida que nos alejamos de la costa y aumenta la profundidad del agua. Pero los virus no son importantes solamente por su abundancia, sino también por la gran diversidad biológica y genética que presentan.

Los organismos microbianos de origen marino no son los únicos poco estudiados. Se cree que todavía hay miles de especies animales por descubrir (v. capítulo 2), además de otras especies ya conocidas en las que la aplicación de nuevos métodos de estudio ha contribuido a afinar nuestro concepto sobre las fronteras que las separan. Por ejemplo, cada vez parece más evidente que las especies de zooplankton marino denominadas «cosmopolitas» son en realidad complejos de especies muy relacionadas entre sí, cada una de las cuales predomina en zonas concretas del océano. Las nuevas técnicas moleculares han puesto de manifiesto estos problemas, pero el estudio morfológico detallado será también una herramienta útil para su resolución.

Existen pocos estudios sobre el plancton de aguas oceánicas más profundas: los océanos son inmensos, y apenas existen sumergibles equipados para extraer muestras a profundidades medias superiores a los 2.000 metros. La cantidad de zooplancton disminuye a medida que aumenta la profundidad, pero se incrementa de nuevo en las zonas más próximas al fondo marino. Esta región de la base de la columna de agua, la zona hiperbentónica, es una región de interacción dinámica entre la columna de agua y el suelo oceánico de la que es difícil extraer muestras. Hay que arrastrar las redes muy cerca de la profundidad máxima (en condiciones ideales, a tan sólo 1 metro por encima del sedimento), sin llegar a tocar el fondo. Las muestras que se han podido conseguir demuestran que en la zona hiperbentónica habitan numerosas especies nuevas, como, por ejemplo, de copépodos, diminutos crustáceos de 1-2 mm de longitud de la familia de los cangrejos y las gambas. La zona hiperbentónica es rica en nuevas especies, nuevos géneros e incluso nuevas familias de copépodos, pero la obtención de muestras sigue siendo uno de los mayores retos de la biología submarina.

No obstante, también se están descubriendo otras especies de mayor tamaño. En el cañón submarino de Monterrey, frente a las costas de California, se ha observado en varias ocasiones la presencia de una medusa de un color rojo intenso, *Tiburonia granrojo* (foto 4.3), a profundidades de 645 metros y superiores. Hasta el momento sólo se ha capturado un ejemplar, pero se sabe que el diámetro de estos predadores



**Foto 4.3: *Tiburonia granrojo*.** Esta medusa, de gran tamaño (hasta 90 cm), ha sido recientemente descubierta en la costa del Pacífico este (EE. UU.).

oscila entre 60 y 90 cm. Una característica poco habitual de esta nueva especie es que carece de tentáculos alrededor de su cuerpo –en forma de campana–, los cuales son utilizados por la mayoría de las medusas para cazar a sus presas; en lugar de tentáculos, posee entre cuatro y siete brazos gruesos y arrugados en su parte inferior.

Gracias a la utilización de una amplia variedad de técnicas, desde la extracción de ADN en muestras de agua hasta la incorporación de redes a los brazos robóticos de sumergibles tripulados, los biólogos marinos siguen hallando e identificando nuevas formas de vida. Entre ellas se encuentran desde los más pequeños organismos microbianos, de unos pocos micrómetros de tamaño, hasta grandes animales que pueden alcanzar incluso 1 m de longitud. En la actualidad podemos afirmar con seguridad que en la inmensidad del reino pelágico existe un elevadísimo número de nuevas especies aguardando ser descubiertas.

#### 4.2.1.1. PUNTOS CALIENTES

El concepto de puntos calientes (*hotspots*) de biodiversidad, entendidos como regiones que destacan por su gran riqueza biótica, se ha adoptado como método para identificar zonas prioritarias en los programas de conservación. En la actualidad sólo se han reconocido unos pocos puntos calientes en el reino marino, incluyendo los arrecifes de coral, las fuentes hidrotermales y las surgencias frías (v. capítulo 3). En cierta medida, la dificultad para aplicar el concepto de puntos calientes al plancton es un reflejo de la ausencia de barreras físicas claras en los océanos. Con todo, estudios recientes han revelado que el plancton de cuevas anquialinas y submarinas es muy rico en especies nuevas.

Los hábitats anquialinos son cuevas litorales y submarinas que carecen de una superficie de contacto directo con el mar abierto. En ellos viven animales muy especializados, muchos de los cuales se consideran supervivientes de antiguos linajes que en la actualidad se encuentran amenazados por alteraciones de su frágil hábitat. En los últimos 25 años se han descrito cerca de 250 nuevas especies, al menos 17 nuevas familias e incluso una nueva clase de crustáceo remipedio de aspecto parecido a una gamba en muestras de plancton de cuevas anquialinas (foto 4.4), especialmente en islas tropicales y subtropicales.

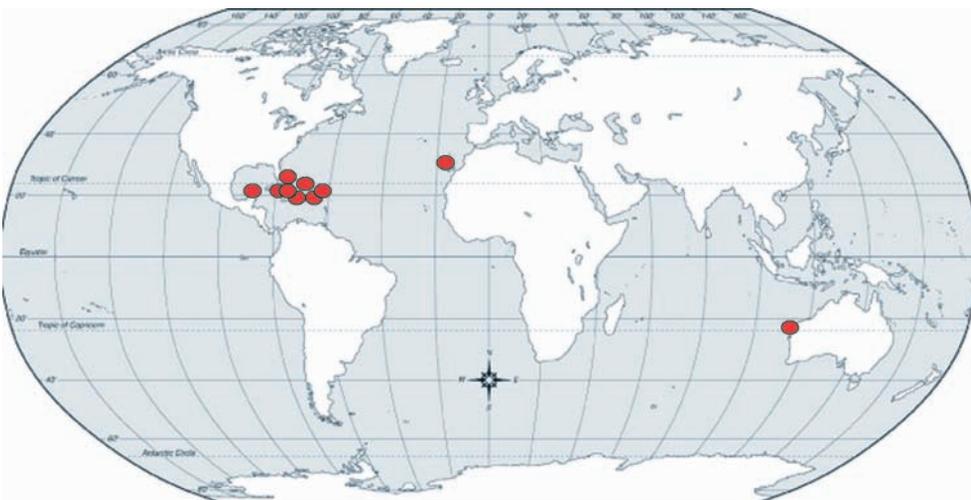
El asombroso número de nuevas especies en las cuevas anquialinas las convierte en un hábitat único y extraordinario. Un elevado porcentaje de los crustáceos que viven en ellas podrían considerarse fósiles vivientes. Los estudios de animales tan primitivos han arrojado nueva luz sobre la trayectoria evolutiva y las relaciones de numerosos grupos de animales. Además, los animales de las cuevas poseen características genéticas poco frecuentes que, por ejemplo, les permiten sobrevivir en aguas con niveles muy reducidos de oxígeno disuelto. Con las potentes técnicas de la genética moderna, estos animales con adaptaciones únicas se perfilan como una posible fuente de genes.



**Foto 4.4: Remipedio de cuevas anquialinas de Cayo Exuma, en las islas Bahamas.** En la actualidad sólo se conocen 16 especies de remipedios en todo el mundo, y todas ellas se han hallado únicamente en cuevas anquialinas.

La exploración de las cuevas se encuentra todavía en una fase inicial, y aún estamos lejos de conocer y comprender cómo se colonizaron las cuevas y en qué lugar aparecieron las primeras colonias. Como ejemplo cabe destacar la distribución de los remipedios (mapa 4.1): 14 de las 16 especies conocidas viven en el Caribe y en la península del Yucatán; respecto a las otras dos especies, una habita en un tubo

**Mapa 4.1: Distribución conocida de las especies de remipedios**



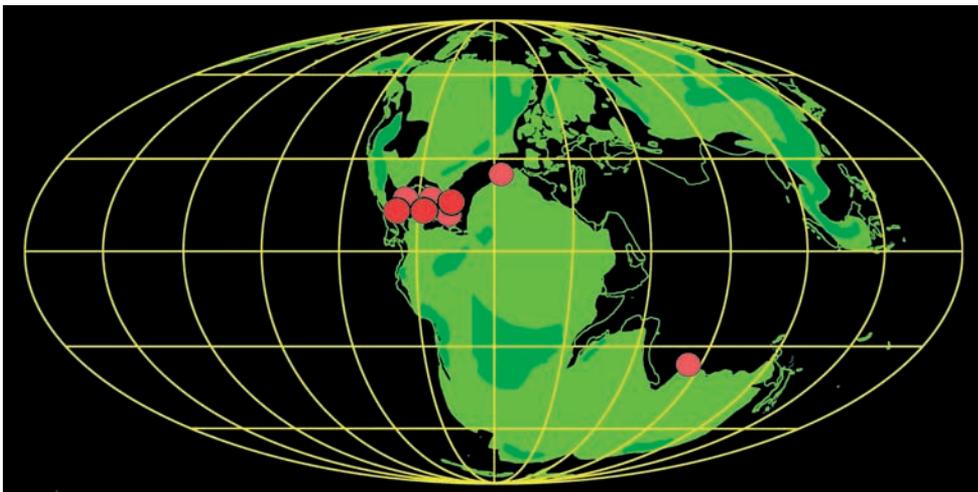
de lava anegado de Lanzarote, y la otra se localiza en una cueva al oeste de Australia. Otros crustáceos que componen la fauna anquialina (por ejemplo, los ostrácodos del género *Thaumatocypris* y los copépodos de las familias Epacteriscidae y Speleophriidae) presentan también patrones de distribución similares. ¿Cómo se explica esta distribución tan extremadamente dispar?

Las hipótesis actuales sugieren que la característica distribución de los remipedios y otros animales tiene que ver con movimientos tectónicos producidos a lo largo de periodos geológicos (mapa 4.2).

Algunos autores sugieren que la fauna anquialina se extendía por los márgenes cálidos y poco profundos del antiguo mar de Tethys, que algunos organismos colonizaron cuevas próximas a estas aguas poco profundas y que posteriormente fueron separados cuando los movimientos tectónicos de la Tierra provocaron la apertura del Atlántico y el cierre del mar de Tethys. Estos organismos han sobrevivido en las cuevas durante largos periodos de tiempo geológico, ajenos a los cambios globales del nivel del mar. Es probable que las cuevas sirvieran de refugio térmico para la fauna anquialina durante la última era glacial, por ejemplo. La utilización de técnicas moleculares nos permitiría demostrar estas teorías con relativa facilidad, pero hasta ahora no ha sido posible, debido a la dificultad que entraña la extracción de muestras en muchas de las cuevas.

Es fundamental que localicemos y exploremos nuevas zonas anquialinas en todo el mundo y describamos todas las especies existentes antes de que sea demasiado tarde. Investigaciones de este tipo nos facilitarán la resolución de algunas cuestiones ecológicas y evolutivas interesantes, como, por ejemplo, cuál es el origen de

**Mapa 4.2: Reconstrucción que muestra la distribución de las zonas habitadas por los remipedios en relación con la posición de las masas continentales hace 120 millones de años, durante el periodo Jurásico**



esta fauna tan primitiva y qué razón explica sus sorprendentes pautas de distribución. Además debemos estudiar las amenazas que acechan a las regiones anquialinas más importantes, para luego promover la inclusión de estos hábitats en las iniciativas de protección costera de los responsables políticos y conservacionistas.

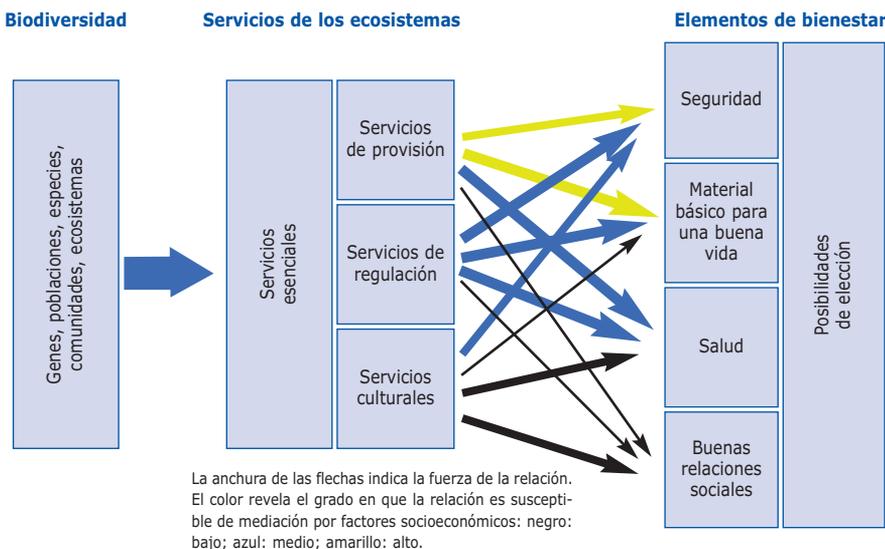
El descubrimiento de nuevas especies y nuevos patrones de distribución contribuye al desarrollo del conocimiento sobre los océanos, y nos permite realizar una evaluación inicial de lo que está pasando en los océanos. Se trata de un primer paso imprescindible, al proporcionar una referencia para el seguimiento y la medición de los cambios futuros.

#### 4.2.2. Comprender

El avance en los conocimientos sobre ecología y los ciclos globales de todo tipo de elementos y recursos ha comportado un cambio conceptual en nuestra manera de entender los ecosistemas terrestres. Este cambio se debe en parte a la aparición de una nueva manera de cuantificar la dependencia del hombre de los servicios y funciones de los ecosistemas naturales (Costanza et al. 1997; esquema 4.1).

Los servicios de los ecosistemas se han clasificado en servicios de provisión –tales como la provisión de alimentos para el consumo humano–, servicios de regulación –como el papel de los océanos en la regulación del clima (p. ej., el transporte de

**Esquema 4.1: Relaciones entre la biodiversidad, los servicios del ecosistema y el bienestar del hombre**



Fuente: *Millennium Ecosystem Assessment*, Washington, D. C., World Resources Institute, 2005.



**Foto 4.5: Larvas del percebe *Semibalanus balanoides*.** Muchos organismos de los fondos marinos tienen fases larvarias que forman parte temporalmente de las comunidades planctónicas, como es el caso de estas larvas de percebes.

calor hacia el norte en el Atlántico a través de la corriente del Golfo), servicios culturales –tales como actividades de ecoturismo o avistamiento de ballenas– y servicios esenciales –como la regulación del gas atmosférico–. Los océanos en general, pero también los grandes sistemas pelágico-planctónicos, son fundamentales para el suministro de muchos de los servicios y funciones de los que depende la continuidad del bienestar social.

El hombre ha dado siempre por hecho la existencia de estos servicios. No obstante, los recientes avances en el conocimiento y la comprensión de los sistemas terrestres han puesto de manifiesto nuestra elevada dependencia de los sistemas naturales para obtener el oxígeno que respiramos y los alimentos y el agua que ingerimos. Todos los organismos vivos, y la biosfera donde habitan, son elementos que interactúan en un único sistema global cuya dinámica se estudia en términos de flujo de materia, es decir, como ciclos biogeoquímicos globales.

#### 4.2.2.1. EL CICLO DEL CARBONO Y LA FOTOSÍNTESIS

Los océanos son parte integral de los procesos naturales del ciclo del carbono a escala global. Se estima que desde la época preindustrial, hace más de 200 años, han absorbido cerca de la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la combustión

de los hidrocarburos y la producción de cemento. Se calcula que los océanos y los organismos que los habitan almacenan 38.000 gigatoneladas de carbono, cifra que equivale al 95% de todo el carbono del conjunto de los océanos, la atmósfera y la superficie terrestre. Los océanos constituyen un gran reservorio de carbono, pero su capacidad para absorber el CO<sub>2</sub> atmosférico disminuirá a medida que aumenten las cantidades de éste en la atmósfera.

La abundancia de vida en la superficie de la Tierra depende prácticamente en su totalidad de la fotosíntesis, proceso natural que utiliza la energía luminosa del Sol para fijar CO<sub>2</sub>. La principal fuente de luz de los hábitats naturales es el Sol, y por este motivo la fotosíntesis se circunscribe en gran medida a medios solares fóticos de la superficie terrestre. Durante mucho tiempo, los integrantes del fitoplancton eucariótico marino, en especial las diatomeas, y en menor grado también los dinoflagelados, fueron considerados los organismos fotosintéticos más abundantes de los océanos. No obstante, más recientemente se ha observado que las bacterias de los océanos también pueden realizar la fotosíntesis a gran escala. Hace un par de años, por ejemplo, Craig Venter et al. (2004) encontraron 782 genes pseudo-rodopsina en el mar de los Sargazos. La fotosíntesis mediada por rodopsina que efectúan las bacterias del plancton puede desempeñar un papel muy importante en el flujo de energía y carbono en los océanos.

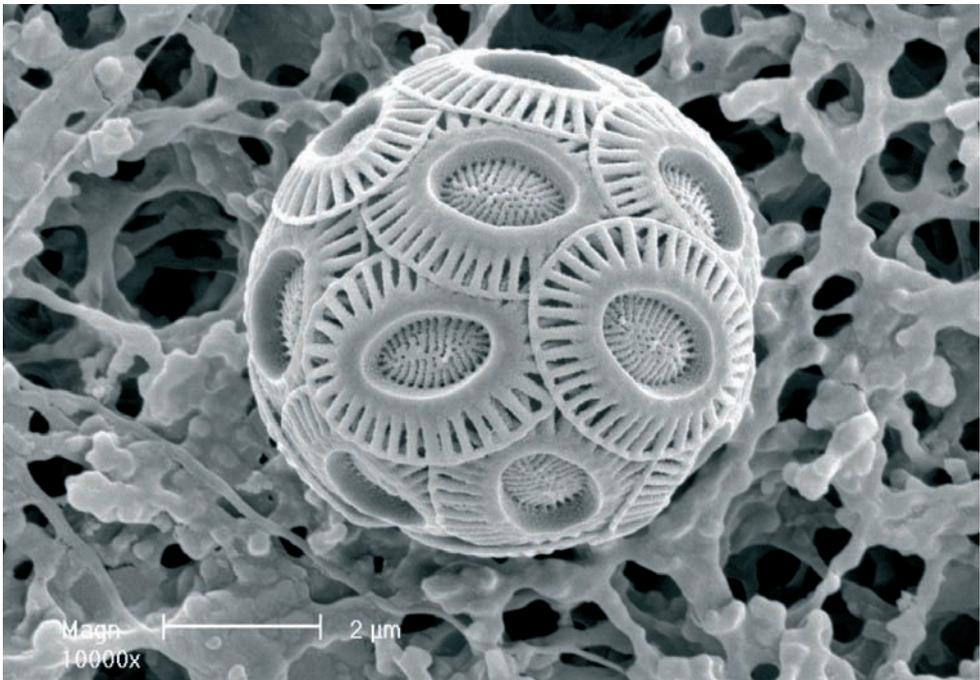
Con el tiempo hemos llegado a conocer mejor el papel del plancton marino en los ciclos biogeoquímicos globales (Raven y Falkowski 1999). La actividad fotosintética del bacterioplancton y el fitoplancton se utiliza para fijar el carbono de modo que otros organismos del plancton lo aprovechen. En este punto, el tamaño es muy importante, ya que determina si la producción primaria sigue hacia la red alimentaria microbiana o se dirige hacia la cadena trófica tradicional, en la que el fitoplancton de mayor tamaño es consumido por el zooplancton y éste, a su vez, por los peces.

La base de las redes tróficas microbianas la constituyen organismos fotosintéticos, conocidos como picoplancton. Estos organismos son tan pequeños, que una gran parte de la materia que producen no puede ser aprovechada por herbívoros del zooplancton como los copépodos, y se transfiere a través de bacterias, flagelados heterotróficos de pequeño tamaño y ciliados. Se cree que este tipo de red trófica es la más común en los océanos, especialmente en regiones estratificadas y oligotróficas (con baja productividad), donde se encarga de dirigir la transferencia de energía y materia en la zona epipelágica. La estrecha relación entre consumidores y productores es una de las principales características de las redes tróficas bacterianas, en las que dominan los procesos de reciclado de la energía sobre los procesos de exportación de energía y materia desde el sistema. Estos dos tipos de redes tróficas coexisten y están interrelacionados. Se cree que los pequeños copépodos del zooplancton desempeñan un papel importante en esta relación. Por un lado, su reducido tamaño sugiere que pueden alimentarse de organismos menores, como la fracción más pequeña del nanoplancton, y así saltar varios niveles tróficos. Por otro lado, y a diferencia de los copépodos de tamaño medio y grande –productores

res de grandes partículas fecales que pueden descender y salir de la zona fótica, transportando el carbono fuera de las aguas superficiales—, los copépodos pequeños producen partículas fecales también pequeñas. Estas partículas descienden hacia el fondo a muy baja velocidad y probablemente sean consumidas antes de abandonar la zona eufótica. Por último, algunos copépodos, como ciertas especies del género *Oncaea*, se alimentan de la nieve marina, y otros, como algunas especies de *Oithona*, de las partículas fecales de otros organismos del zooplancton. Como resultado se potencian los procesos de reciclaje en las capas superiores del agua y se retrasa la exportación vertical de materia y energía.

El movimiento de carbono orgánico desde la superficie hacia el fondo se conoce como «bomba biológica» (suma de todos los procesos biológicos responsables del transporte de carbono desde la zona eufótica bien iluminada hacia las capas más profundas del océano).

La escala de la bomba biológica convierte a los océanos en la mayor reserva activa de carbono del planeta. Existe también un componente inorgánico en el flujo del carbono que llega a las aguas profundas del océano, en forma de conchas o placas de carbonato cálcico producidas por algunos organismos del plancton, como los cocolitofóridos (foto 4.6) y los foraminíferos.



**Foto 4.6:** El cocolitofórido *Emiliana huxleyi*, observado al microscopio. En esta imagen, obtenida mediante un microscopio de barrido electrónico, se pueden observar placas complejas de carbonato cálcico inorgánico (escamas) sobre la superficie externa del alga.



**Foto 4.7:** Imagen por satélite del extenso florecimiento de algas cocolitofóridas en las aguas entre las costas de Francia y Reino Unido

En ciertas condiciones puede producirse el florecimiento de algas cocolitofóridas (foto 4.7) y generarse grandes cantidades de carbonato cálcico inorgánico (en forma de escamas). La velocidad de disolución del carbonato cálcico depende de la química del carbonato, que a su vez viene determinada por factores locales, como la temperatura y la profundidad. Sin embargo, estos procesos de disolución suelen ser más lentos que los procesos de síntesis. En general, la bomba biológica se encarga de transportar materia desde la superficie hacia las aguas profundas del océano.

#### 4.2.2.2. EL CICLO DEL NITRÓGENO

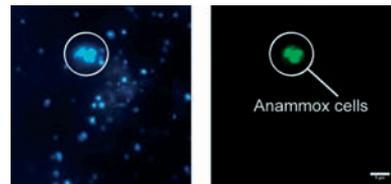
Los océanos desempeñan asimismo un papel fundamental en el ciclo del nitrógeno. Desde hace mucho tiempo se sabe que en ellos viven algunas especies de cianobacterias fijadoras de nitrógeno, y se suponía que los organismos filamentosos de *Trichodesmium* (foto 4.8) eran los principales agentes responsables. Sin embargo, la abundancia de *Trichodesmium* en los océanos no podía explicar la tasa de fijación observada. Estudios recientes, como los realizados por Zehr y sus colaboradores en 2001, han encontrado abundantes cianobacterias unicelulares de entre 3 y 10  $\mu\text{m}$  de longitud que expresan enzimas nitrogenasas, un indicador de su capacidad para fijar nitrógeno. Estos organismos picoplanctónicos no se han estudiado todavía

**Foto 4.8:** Colonia filamentosa de *Trichodesmium*, cianobacteria fotosintética de gran tamaño fijadora de nitrógeno



con detalle, pero los resultados parecen apuntar a una ruta trófica diferente a la de otros organismos fijadores de nitrógeno.

La función contraria, es decir, la conversión de nutrientes en nitrógeno gaseoso, es un proceso que efectúan otras bacterias picoplanctónicas. Estudios recientes han mostrado que gran parte de la conversión inversa no la realizan bacterias desnitrificadoras que conviertan el nitrato en nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno, tal y como se creía, sino bacterias *anammox* (foto 4.9) que eliminan el amonio directamente del océano (Kuypers et al. 2005).



**Foto 4.9:** Fotografías de una bacteria *anammox*. El término *anammox* proviene del acrónimo en inglés de oxidación anaeróbica del amonio.

Estas bacterias, descubiertas por primera vez en aguas pobres en oxígeno del mar Negro, se han hallado ahora también en océano abierto, en aguas igualmente pobres en oxígeno del Atlántico sur, frente a las costas de Namibia, donde se producen fenómenos de corrientes ascendentes, y se calcula que el 30-50% de la conversión total de nutrientes a nitrógeno gaseoso tiene lugar en estas zonas. Este descubrimiento supone un gran avance en el conocimiento del ciclo global del nitrógeno, dado que, en el sistema tan complejo de interconexiones de la Tierra, las variaciones en la cantidad de nitrógeno disponible repercutirán en el ciclo global del carbono.

*Trichodesmium* destaca entre los organismos marinos fijadores de nitrógeno por el gran tamaño de sus colonias, que pueden crecer en medios pelágicos del océano abierto pobres en nutrientes donde los niveles de fósforo –esencial para el crecimiento– son extremadamente bajos. Uno de los factores que explican este fenómeno es su capacidad, recién descubierta, para usar fosfonatos como fuente de fósforo, cuando siempre se había pensado que el fitoplancton no podía utili-

zarlos. Gracias a esta capacidad, *Trichodesmium* aumenta la biodisponibilidad de fósforo, y éste, a su vez, es empleado por otros organismos del plancton en las redes tróficas microbianas y tradicionales. Por su doble participación en el ciclo del carbono y en el ciclo del nitrógeno, *Trichodesmium* se ha convertido en un modelo para el estudio de la fisiología del plancton: hallazgos recientes indican que el estudio detallado de la diversidad de productores primarios de origen microbiano nos desvelará una diversidad similar en los procesos fisiológicos básicos.

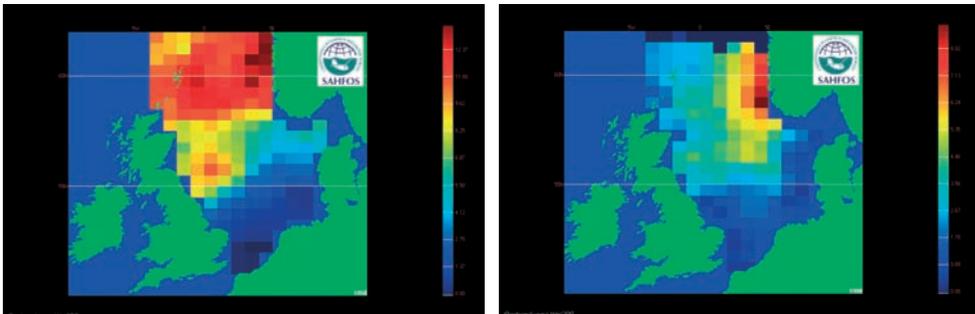
Los virus marinos son una de las principales causas de mortalidad entre los organismos microbianos del plancton y, como tales, también participan en los ciclos de nutrientes. Los virus actúan como catalizadores, acelerando la transformación de nutrientes desde un estado particulado (microorganismos vivos) hasta un estado disuelto, para ser incorporados nuevamente a la comunidad microbiana. Esta «lanzadera vírica» reduce la eficiencia de la transferencia de carbono hacia niveles tróficos superiores, aumenta la respiración de la comunidad y, de forma indirecta, disminuye el transporte de carbono desde la zona eufótica hacia aguas más profundas. Estas observaciones ponen de manifiesto que hasta el más pequeño de los microorganismos puede tener importantes implicaciones en los ciclos biogeoquímicos globales.

#### 4.2.2.3. PROMOTORES DEL CAMBIO: DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO

Las posibles alteraciones en la biodiversidad marina y el funcionamiento de los ecosistemas despiertan gran preocupación en relación con el cambio climático global. Los organismos del plancton son indicadores ecológicos muy útiles, y el estudio minucioso de sus patrones de variación nos ayudará a diferenciar entre variabilidad natural y cambios antropogénicos. Gracias a los datos de la serie temporal recogidos en el programa de registro continuo del plancton CPR (Continuous Plankton Recorder) se han podido demostrar algunos cambios en los patrones biogeográficos del Atlántico norte. Existen evidencias de que algunas especies de plancton subtropical están avanzando hacia el norte como respuesta al calentamiento global. Asimismo, otras especies del norte, como el abundante copépodo *Calanus finmarchicus*, están desplazándose en dirección al polo desde zonas más meridionales (mapa 4.3).

Investigaciones recientes (Beaugrand et al. 2002) demostraron que los copépodos de aguas templadas avanzaron 10° de latitud hacia el norte, con la correspondiente retirada de otras especies de aguas frías.

No es fácil disponer de datos a largo plazo para los organismos marinos. El programa CPR se ha venido realizando con sólo breves interrupciones durante casi 70 años, y actualmente constituye la mayor y más completa serie de datos activa

**Mapa 4.3: Distribución en retículas de *Calanus finmarchicus* en el mar del Norte**

La comparación entre las distribuciones en 1958 (izquierda) y 1988 (derecha) muestra la regresión en el norte de este copépodo de aguas frías.

Fuente: Vezzulli et al. 2005.

del mundo. Las agencias de financiación de la investigación no suelen reconocer el inmenso valor que tiene la recogida de datos a lo largo de los años, y muchas series se encuentran en una situación delicada, a pesar de ofrecernos una perspectiva excelente sobre aspectos relacionados con los cambios ambientales. Uno de los desafíos prácticos que deben afrontar los biólogos marinos consiste en asegurar la continuación de programas como éste.

Otro importante hallazgo derivado del programa CPR es la constatación de la interrupción de la red trófica planctónica como resultado del calentamiento global durante la segunda mitad del siglo XX. En la base de la red trófica tradicional se encuentran las diatomeas, que son ingeridas por los copépodos, organismos tremendamente eficaces en la captación de células de algas. A su vez, los copépodos son ingeridos por consumidores secundarios de la cadena alimentaria, como larvas de peces, entre ellos el bacalao, y algunos peces adultos como el arenque. Durante el invierno, las diatomeas de las aguas templadas del Atlántico norte presentan poca actividad: los niveles de luz son bajos y, por tanto, la tasa de fotosíntesis también. En primavera, los niveles de luz aumentan y los niveles de fosfonatos y nitrógeno de la columna de agua se elevan gracias a las tormentas invernales, como consecuencia de lo cual empiezan a florecer las diatomeas. El florecimiento primaveral de algas constituye para el plancton una importante fuente de recursos, una aportación masiva de biomasa y de energía. Después del florecimiento primaveral se produce un pico máximo de zooplankton en las aguas. Los copépodos del zooplankton se reproducen a gran velocidad gracias a la utilización de la biomasa disponible de algas. Las larvas de pez se alimentan, a su vez, de los copépodos de mayor tamaño y longevidad. Estudios recientes (Edwards y Richardson 2004) han demostrado que el factor que determina el momento de máximo florecimiento primaveral es la duración del día, y que no ha cambiado como consecuencia del calentamiento global. En cam-



**Foto 4.10: Pesquería de túnidos.** Los peces de la familia de los túnidos constituyen un recurso marino de alto valor comercial, pero la falta de regulación de sus pesquerías en aguas internacionales ha reducido drásticamente las capturas. Por ello se hace urgente la creación de reservas marinas protegidas en alta mar.

bio, la aparición del pico máximo de zooplancton depende de la temperatura, y, según se ha observado, el aumento de la temperatura del océano ha provocado que la aparición de zooplancton se adelante progresivamente a lo largo del año. Hay un desajuste temporal en el sistema, por lo que el zooplancton se reproduce antes de tiempo, adelantándose ligeramente al florecimiento de las algas, su fuente de alimento. Los organismos que componen este sistema han evolucionado en paralelo durante millones de años, pero en la actualidad el sistema se encuentra en una situación delicada.

Los organismos vivos tienen una gran capacidad de adaptación al medio. No obstante, la velocidad de alteración dictada por el cambio climático no tiene precedentes en la historia. El sistema planctónico no consigue adaptarse. La falta de copépodos como fuente de alimento para las larvas de peces tendrá consecuencias en el reclutamiento de reservas pesqueras. Y, en efecto, el desajuste entre los niveles tróficos y los grupos funcionales ya se ha señalado como uno de los factores responsables de la no recuperación de los bancos de bacalao en el mar del Norte, a pesar de las medidas de control de pesca puestas en práctica (Beaugrand et al. 2003). El ecosistema del plancton sobrevivirá a los cambios. El florecimiento primaveral de algas continuará siendo una fuente importante de recursos, y los orga-

nismos lo explotarán; pero no sabemos si estos organismos serán o no componentes de la red alimentaria microbiana adecuados como alimento para las larvas de peces. El problema se agravará si el cambio en el plancton es irreversible. Podemos predecir con casi total seguridad que el sistema no se comportará del mismo modo que lo ha hecho en los últimos siglos, y que ello afectará profundamente a la industria pesquera. En general, vaticinios de este tipo sólo se pueden aplicar a sistemas concretos de regiones específicas, y debemos ampliar nuestros conocimientos para poder pronosticar los efectos del cambio a gran escala. Para ello será necesario desarrollar nuevas series temporales que nos proporcionen una red de puntos de muestreo en todo el mundo y nos ofrezcan una imagen más real del estado actual de los océanos.

Otro factor impulsor de cambio, incluso en los sistemas planctónicos marinos, son las especies invasivas. Especies de zooplancton gelatinoso no autóctonas se han introducido en diversas regiones y han participado en cambios importantes en sistemas semicerrados. Por ejemplo, el ctenóforo predador *Mnemiopsis leidyi* fue introducido en el mar Negro a principios de los años ochenta, probablemente a través del agua de lastre de los barcos. Tras un masivo crecimiento se registró una rápida reducción del mesozooplancton y el ictioplancton (huevos y larvas de espadín y anchoas) (Kidneys 2002). No obstante, es importante destacar que el crecimiento explosivo de *Mnemiopsis* fue precedido por un descenso del número de peces que se alimentan de plancton debido a la pesca excesiva. La disminución de la población de estos peces, sus principales competidores, podría explicar también el brote de *Mnemiopsis*, lo cual pondría de nuevo de manifiesto la vulnerabilidad de los sistemas más frágiles.

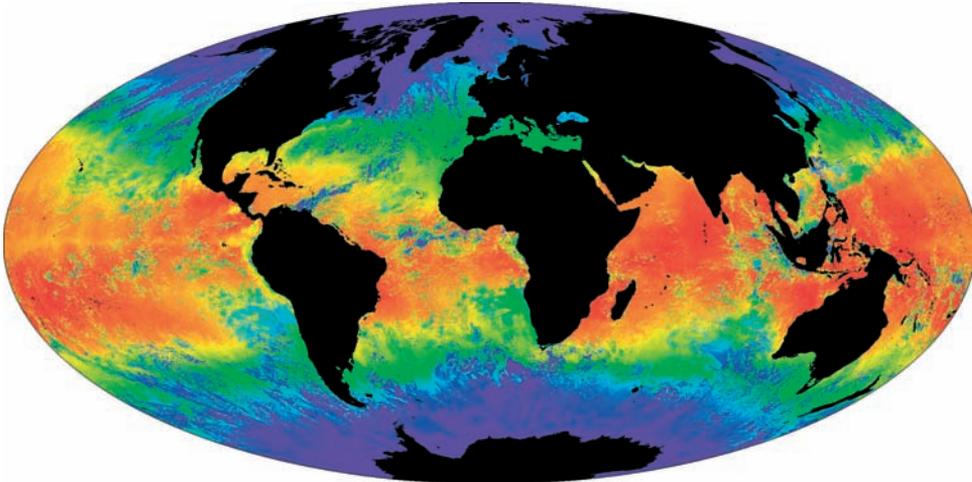
Los florecimientos de zooplancton gelatinoso son cada vez más frecuentes, y algunos investigadores han descrito sus efectos nocivos en los ecosistemas y la pesca de las aguas del este del Mediterráneo, Japón y el mar del Norte. Igualmente se prevé que el aumento de la biomasa de medusas en el mar de Bering, dominado en la actualidad por *Chrysaora melanaster*, también tenga consecuencias directas sobre la pesca de arrastre. La presencia relativa de las especies dominantes puede variar a lo largo del tiempo, pero cambios súbitos como el florecimiento y las invasiones de medusas parecen estar ya indicándonos la inestabilidad de los ecosistemas. Asimismo, nuestro creciente conocimiento sobre el papel de las especies raras en los ecosistemas sugiere que las débiles relaciones tróficas existentes entre ellas pueden favorecer la estabilidad del resto de la red alimentaria. Un reto importante consiste en desarrollar un modelo teórico que describa la relación entre la estabilidad y la diversidad de especies de los sistemas planctónicos marinos. La teoría actual, basada en un modelo terrestre, no se aplica bien al medio marino, y es preciso que comprendamos mejor los factores que hacen que algunos sistemas marinos sean más vulnerables a las invasiones que otros y por qué algunas especies raras pueden convertirse repentinamente en comunes.

### 4.2.3. Predecir

Además de documentar y describir los organismos vivos de los océanos, y de ampliar nuestro conocimiento sobre las interacciones que se establecen entre ellos y su papel en los ciclos biogeoquímicos globales, es necesario utilizar mejor los resultados de estos trabajos de investigación. En concreto, tenemos que realizar estudios y obtener datos a largo plazo que se incorporen en el desarrollo de modelos que nos ayuden a predecir de qué manera algunos factores abióticos –como el calentamiento global, el aumento del nivel del mar y la acidificación (resultado de un incremento del  $\text{CO}_2$ )– pueden ocasionar cambios en el plancton. En la actualidad disponemos de datos sobre la temperatura (mapa 4.4), la clorofila de la superficie y el transporte de carbono a escala global gracias a los satélites. La integración de estos datos globales con datos regionales y locales es una importante línea de trabajo en el campo de la investigación.

El desarrollo de modelos de predicción del cambio climático a gran escala ha sido valorado muy positivamente por la comunidad mundial de climatólogos. El Comité Internacional sobre Cambio Climático depende cada vez más de modelos complejos que precisan la utilización de superordenadores para prever los efectos del calentamiento global sobre el clima regional en las próximas décadas. Estos modelos han permitido a los climatólogos transmitir bien sus ideas sobre el comportamiento de sistemas complejos al gran público y a los responsables políticos, especificando incluso el nivel de incertidumbre asociado a dichas predicciones. En el campo de la biología oceanográfica, el mayor desafío al que nos enfrentamos radica en desarrollar modelos complejos capaces de pronosticar cómo cambiarán los sistemas planctónicos y averiguar si los océanos continuarán proporcionándonos los servicios de los que depende nuestro bienestar.

**Mapa 4.4: Temperatura de la superficie global del mar.** La temperatura aumenta desde el color violeta (aproximadamente 0 °C) hasta el color rojo (aproximadamente 28 °C).





**Foto 4.11: Medusa (*Cotylorhiza tuberculata*).** En aguas pelágicas abiertas, el plancton gelatinoso integrado por medusas sirve de refugio y foco de atracción a algunas comunidades de pequeños peces.

### 4.3. CONCLUSIÓN

Sabemos poco sobre la biología de los océanos que nos rodean. Dada su inmensidad, quizá no sea de extrañar que nuestro conocimiento sobre los microorganismos marinos resulte tan incompleto. Sin embargo, el desarrollo de nuevas técnicas moleculares ha proporcionado nuevas y potentes herramientas de estudio que están contribuyendo a reconfigurar nuestras ideas. La vida microbiana en los océanos es mucho más diversa de lo que nunca habíamos imaginado, y la diversidad fisiológica bacteriana está cambiando nuestras teorías sobre los procesos de flujo de materia en los ciclos biogeoquímicos. En términos funcionales, está claro que la cadena trófica microbiana es al menos tan importante como la tradicional diatomea-copépodo-pequeño pez. El objetivo final de las investigaciones sobre biología marina debe ser el desarrollo de modelos capaces de integrar los conocimientos disponibles sobre la diversidad del plancton con nuestro mejor entendimiento del funcionamiento de los sistemas planctónicos. Estos modelos nos permitirán predecir el cambio, pero también, y más importante si cabe, usar nuestro conocimiento para hacer más sostenible la utilización de los océanos en beneficio de la humanidad. Los retos científicos a los que nos enfrentamos en esta tarea son:

- Documentar y describir la diversidad de la vida en el plancton, incluyendo la diversidad microbiana.

- Explorar y estudiar la biodiversidad única que se observa en algunos puntos calientes, como las cuevas anquialinas.
- Entender el papel de la biodiversidad en los ciclos globales.
- Medir los cambios en la biodiversidad a lo largo del tiempo y desarrollar una red global de puntos de observación.
- Identificar los promotores del cambio en el plancton.
- Desarrollar modelos robustos que expliquen cómo cambiará el plancton en respuesta a cambios ambientales regionales y globales.

## BIBLIOGRAFÍA

- BEAUGRAND G., K. M. BRANDER, J. A. LINDLEY, S. SOUISSI, y C. P. REID. «Plankton effect on cod recruitment in the North Sea». *Nature* 426 (2003): 661-664.
- BEAUGRAND, G., C. P. REID, F. IBÁÑEZ, J. A. LINDLEY, y M. EDWARDS. «Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate». *Science* 296 (2002): 1692-1694.
- COSTANZA, R., R. D'ARGE, R. DE GROOT, S. FARBER, M. GRASSO, B. HANNON, K. LIMBURG, et al. «The value of the world's ecosystem services and natural capital». *Nature* 387 (1998): 253-260.
- EDWARDS, M., y A. J. RICHARDSON. «Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch». *Nature* 430 (2004): 81-83.
- KIDNEYS, A. E. «Rise and fall of the Black Sea ecosystem». *Science* 297 (2002): 1482-1484.
- KUYPERS, M. M. M., G. LAVIK, D. WÖBKEN, M. SCHMID, B. M. FUCHS, R. AMANN, B. BARKER JØRGENSEN, y M. S. M. JETTEN. «Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation». *PNAS* 102 (2005): 6478-6483.
- RAVEN, J. A., y P. G. FALKOWSKI. «Oceanic sinks for atmospheric CO<sub>2</sub>». *Plant Cell Environ.* 22 (1999): 741-755.
- VENTER, J. C., K. REMINGTON, J. F. HEIDELBERG, A. L. HALPERN, D. RUSCH, J. A. EISEN, D. WU, et al. «Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea». *Science* 304 (2004): 66-74.
- VEZZULLI, L., P. S. DOWLAND, P. C. REID, N. CLARKE, y M. PAPADAKI. *Gridded database browser of North Sea plankton: fifty years (1948-1997) of monthly plankton abundance from the Continuous Plankton Recorder (CPR) survey*. Plymouth (Reino Unido): Sir Alister Hardy Foundation, 2005. Disponible en CD-ROM.

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS E ILUSTRACIONES

Foto 4.1:	Ballena azul ( <i>Balaenoptera musculus</i> ). © Doc White/naturepl.com ...	94
Foto 4.2:	Krill antártico ( <i>Euphasia superba</i> ). © David Tipling/naturepl.com ...	96
Foto 4.3:	<i>Tiburonia granrojo</i> . © 2002 MBARI .....	99
Foto 4.4:	Remipedio de cuevas anquialinas de Cayo Exuma, en las islas Bahamas. © T. M. Iliffe .....	101
Foto 4.5:	Larvas del percebe <i>Semibalanus balanoides</i> .....	104
Foto 4.6:	El cocolitofórido <i>Emiliana huxleyi</i> , observado al microscopio. © NHM London .....	106
Foto 4.7:	Imagen por satélite del extenso florecimiento de algas cocolitofóridas en las aguas entre las costas de Francia y Reino Unido. © NASA/Visible Earth .....	107
Foto 4.8:	Colonia filamentosa de <i>Trichodesmium</i> , cianobacteria fotosintética de gran tamaño fijadora de nitrógeno .....	108
Foto 4.9:	Fotografías de una bacteria <i>anammox</i> . © Max Planck Institute for Marine Biology .....	108
Foto 4.10:	Pesquería de túnidos. © Ángel M. Fitor/Seaframes .....	111
Foto 4.11:	Medusa ( <i>Cotylorhiza tuberculata</i> ). © Juan Carlos Calvín .....	114
Mapa 4.1:	Distribución conocida de las especies de remipedios .....	101
Mapa 4.2:	Reconstrucción que muestra la distribución de las zonas habitadas por los remipedios en relación con la posición de las masas continentales hace 120 millones de años, durante el periodo Jurásico .....	102
Mapa 4.3:	Distribución en retículas de <i>Calanus finmarchicus</i> en el mar del Norte .....	110
Mapa 4.4:	Temperatura de la superficie global del mar. NASA/Visible Earth ....	113
Gráfico 4.1:	Diversidad bacteriana del mar de los Sargazos .....	98
Esquema 4.1:	Relaciones entre la biodiversidad, los servicios del ecosistema y el bienestar del hombre .....	103

### NOTA SOBRE EL AUTOR

**Geoff A. Boxshall** es actualmente investigador asociado en el Museo de Historia Natural de Londres y catedrático de honor de la Universidad de Londres. Sus principales áreas de investigación son la biodiversidad, la morfología funcional, el comportamiento y la evolución de los copépodos y otros crustáceos, en sus diferentes formas de vida, desde los parásitos hasta el plancton.

e-mail: [g.boxshall@nhm.ac.uk](mailto:g.boxshall@nhm.ac.uk)