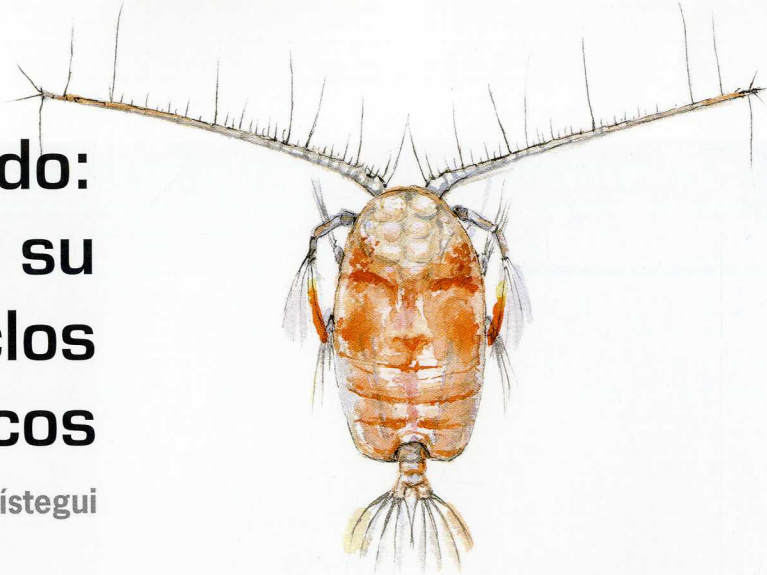


El océano profundo: su exploración y su relevancia en los ciclos biogeoquímicos

Josep M. Gasol y Javier Arístegui



La mayor parte de la superficie del planeta Tierra está recubierta de agua. Como los humanos somos por naturaleza curiosos, cabría suponer que el mar fue explorado desde los albores de la humanidad. Pero el interior del mar se resistió siempre a la observación. Siendo como es un medio hostil a la naturaleza humana, la exploración más allá de unos pocos metros ha estado pendiente del desarrollo de tecnologías apropiadas y sofisticadas, que únicamente han sido posibles en los últimos años. Con la ayuda de submarinos autónomos, vehículos operados remotamente y sondas oceanográficas, desde mediados del siglo XIX se empezó a estudiar el océano profundo. Pero, a pesar de ello, se calcula que solo el 5 por ciento del océano ha sido observado o muestreado. Y es que estamos explorando el océano profundo desde hace solo unos 150 años, aproximadamente el tiempo de vida de una ballena azul.

Los primeros humanos siempre tuvieron temor de lo que se escondía en el océano profundo: un espacio donde se pensaba que habitaban monstruos mitológicos, como el calamar gigante *Kraken*, y que dio lugar a innumerables leyendas desde tiempos inmemoriales, que superaron las épocas del racionalismo científico. Incluso en nuestros días, cuando se ha hecho un esfuerzo importante de inventario de los organismos marinos profundos, estamos tan poco habituados a verlos que nos parecen provenientes de otro mundo^{1,2} y un novelista puede tener éxito describiendo un mar habitado por una civilización distinta a la nuestra y decidida a aniquilarnos.³ Sin embargo, la sensación de que seres monstruosos pueden vivir en los fondos marinos es universal pero también relativamente reciente, puesto que hacia 1840 Edward Forbes, un renombrado oceanógrafo inglés, había postulado la teoría del océano profundo azoico (desprovisto de vida):

[...] A medida que profundizamos más y más en esta región, sus habitantes nos aparecen más y más raros y cada vez más escasos, indicándonos que nos aproximamos a un abismo donde la vida o está extinguida o apenas emite unos destellos para señalar su presencia.⁴

Forbes basó su hipótesis en el hecho de que la abundancia de organismos procedentes de dragados en los fondos marinos disminuía con la profundidad. Según él, nada podía vivir por debajo de los 600 metros. Sin embargo, estudios posteriores de dragados llevados a cabo por otros dos oceanógrafos ingleses, Charles W. Thomson y William B. Carpenter, en el Atlántico Norte y en el mar Mediterráneo, demostraron la existencia de vida a grandes profundidades (fangos de *Globigerina*). La expedición del buque de HMS *Challenger* (1872-1876) al mando de Thomson, considerada como el inicio de la oceanografía moderna, terminó por desmontar la teoría de Forbes, así como la del biólogo británico Thomas H. Huxley, que decía haber encontrado el «fango primordial» del cual provenían todos los otros seres vivos: el famoso *Bathypus haeckelii* (que al final resultó ser un precipitado gelatinoso de sulfato de calcio).

A pesar del pequeño tamaño de las bacterias y de las dificultades para su estudio, a finales del siglo XIX ya se habían descrito en muestras de 5.000 metros de profundidad. Se postuló la hipótesis de que muchas bacterias vivían en «estado de animación suspendida» en el océano profundo, aunque podían soportar grandes presiones hidrostáticas (observaciones de A. Certes en 1882, y de B. Fischer en 1886). Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XX cuando Claude Zobell estableció las bases de la microbiología marina, a partir de sus estudios



colisionan, y una de ellas (la de mayor densidad) se hunde por debajo de la otra; suelen correr paralelas a los continentes o a los arcos de islas, y pueden llegar a tener pendientes de hasta el 45 por ciento. A pesar de su interés para la vida marina, cubren solo un 1 por ciento del suelo oceánico.

Estudiar el océano profundo requiere del uso de instrumental oceanográfico especializado. El equipo

más común para recolectar muestras de agua es la roseta oceanográfica, que desciende verticalmente, mediante un cable conductor, desde la superficie hasta el fondo del océano. Está equipada con botellas oceanográficas y sondas provistas de sensores de profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno, pH, turbidez, etc., lo que nos da un perfil en tiempo real de las características físicas y biogeoquímicas

microbiológicos en aguas profundas durante la expedición del barco danés *Galathea* (1950-1952).

Pasaron casi veinte años más para que se recuperara el interés por los estudios de las bacterias de profundidad, gracias a un accidente fortuito. En 1968 el sumergible *Alvin*, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, se descolgó de su barco nodriza hundiéndose en el océano Atlántico a 1.500 metros de profundidad. Casi un año más tarde, cuando fue recuperado por otro sumergible, los científicos se sorprendieron de encontrar los almuerzos de los pilotos empapados pero en buen estado de conservación.⁵ Las bajas temperaturas, las altas presiones y la «ausencia de bacterias» se consideraron razones suficientes para justificar la falta de degradación de los bocadillos del almuerzo. Este descubrimiento abrió una serie de interrogantes sobre el papel de los microorganismos en el océano profundo: ¿hasta qué punto los microorganismos que habitan el océano oscuro son activos? ¿En términos de biomasa total, son más o menos importantes que los metazoos marinos? ¿Qué papel desempeñan en la biogeoquímica del océano? Estas y otras preguntas se las han hecho muchos oceanógrafos, ecólogos microbianos y biogeoquímicos, y gracias a la investigación efectuada en los últimos años tenemos la posibilidad de empezar a responderlas.

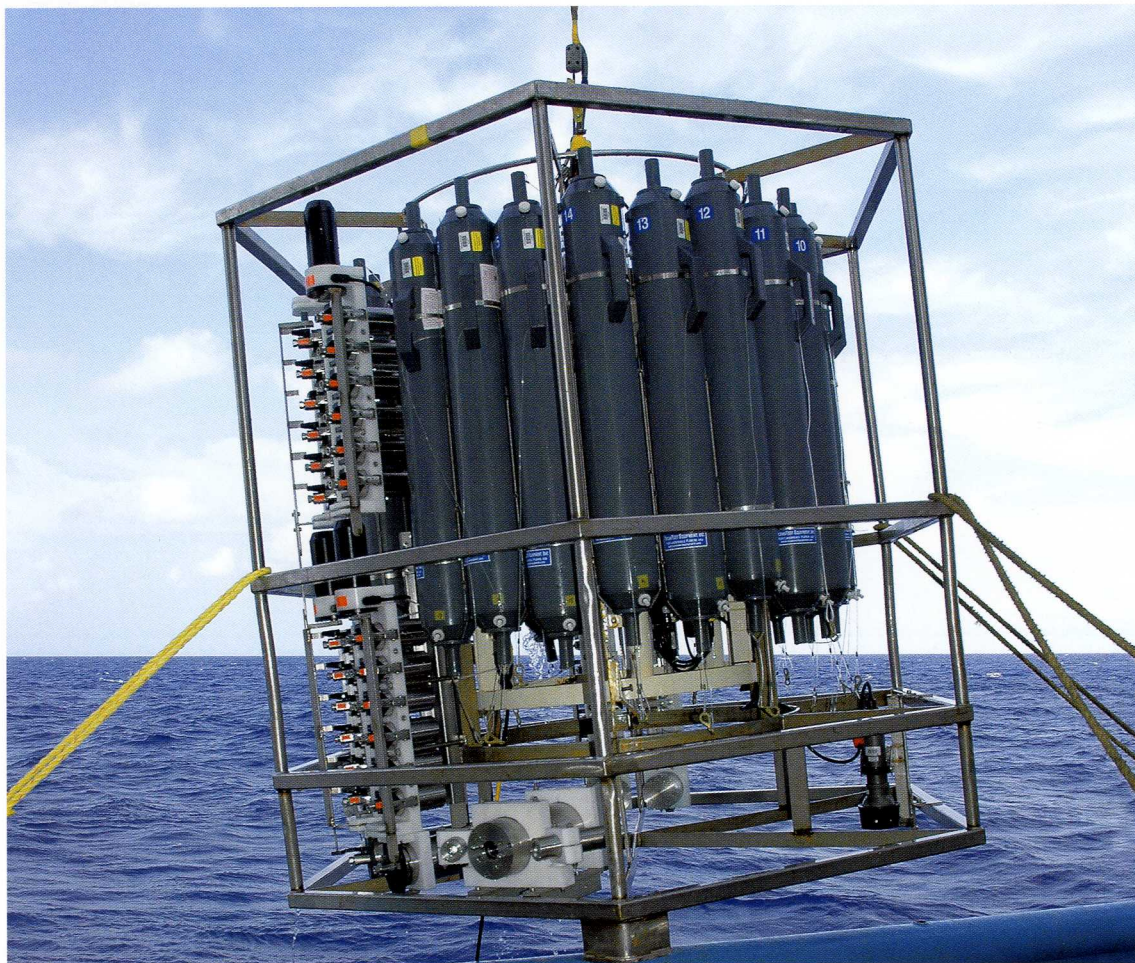
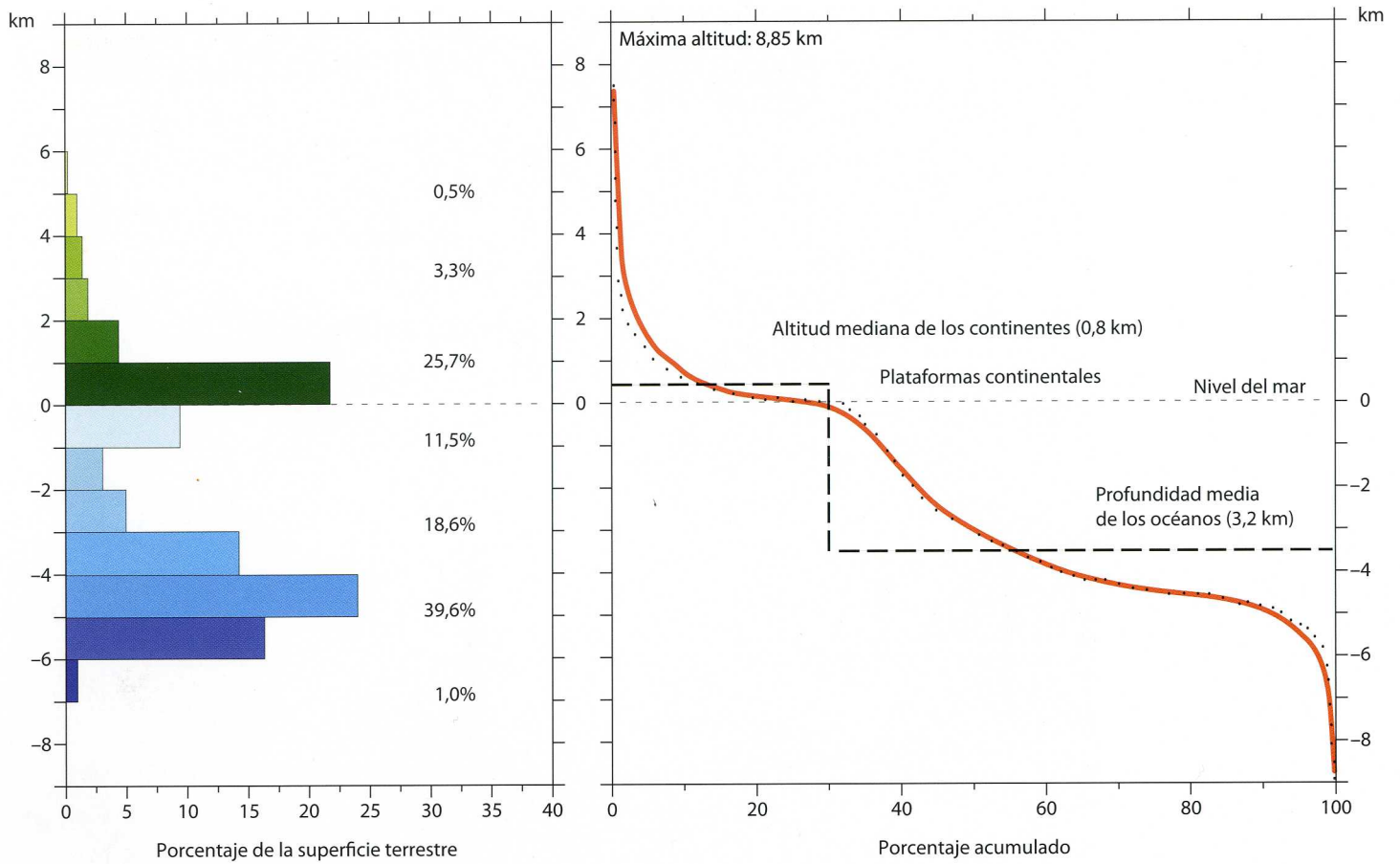
El océano oscuro es el mayor hábitat de la biosfera, con unos $1.3 \cdot 10^{18}$ metros cúbicos. Se caracteriza básicamente por la ausencia de luz que impide la fotosíntesis, aunque la escasa irradiancia que llega entre los 200 y 1.000 metros de profundidad –la denominada *twilight zone* o zona crepuscular– es suficiente para guiar y orientar a muchos organismos. El océano oscuro, a diferencia de las aguas iluminadas de la zona epipelágica (0-200 metros), se caracteriza por sus altas presiones, bajas temperaturas y concentraciones altas de nutrientes inorgánicos. Si se considera la biosfera terrestre como una capa de 38 metros encima de los continentes, el 99 por ciento de la biosfera terrestre está en el mar, tiene una temperatura media de 2°C y está sometida a una presión atmosférica de más de 100 atm. Nuestra percepción de lo que es importante en la biosfera está claramente sesgada por nuestro entorno inmediato: «No necesariamente es lo más importante aquello que vemos continuamente».

El océano oscuro suele subdividirse en la zona mesopelágica (200-1.000 metros), con un tiempo de residencia del agua del orden de décadas y confinado entre la termoclina estacional y la permanente;



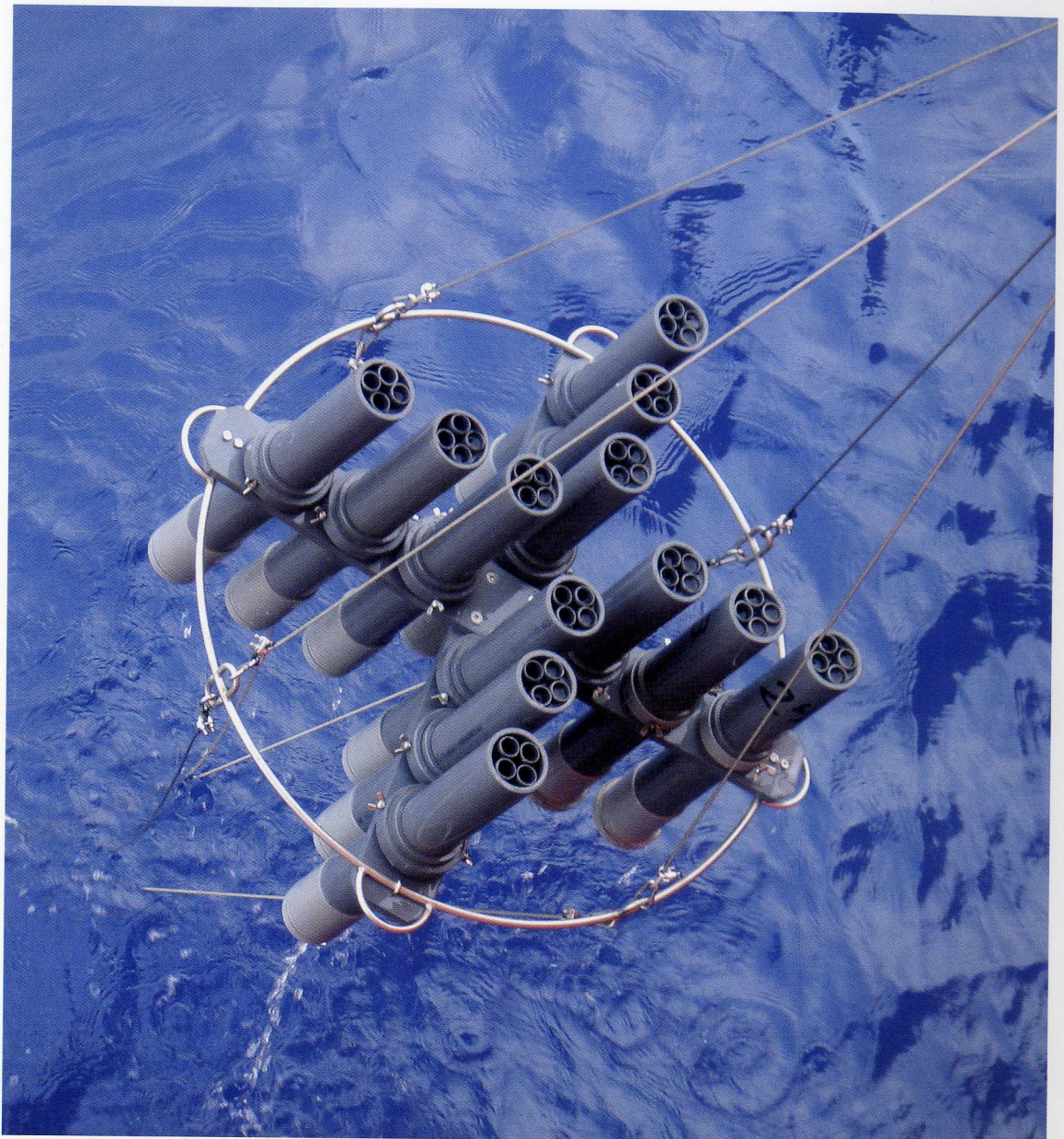
la zona batipelágica (1.000-4.000 metros) y la zona abisal (más de 4.000 metros) con tiempos de residencia del agua de centenares de años. Algunos investigadores distinguen dentro de la zona abisal, la zona hadal (o ultra-abisal), que comprende las fosas oceánicas, las cuales alcanzan desde los 6.000 hasta los 11.000 metros de profundidad. Estas fosas se forman cuando dos placas litosféricas convergen,

▲ Batimetría del océano (imagen reproducida de Gebco word map, <http://www.gebco.net/>).



▲ Hipsografía del mar profundo.

◀ Roseta oceanográfica. La de la foto está provista de cámara de vídeo y sistemas para mantener el agua a la misma presión hidrostática que la que hay a la profundidad donde se recolectan las muestras.



► Imagen de una trampa de sedimento para el muestreo de material particulado que se hunde hacia las profundidades, la cual se deja a la deriva y recoge material proveniente de la superficie.

de la columna de agua. Para estudiar los aportes de materia orgánica desde la superficie a los fondos oceánicos suelen instalarse trampas de sedimentos a distintas profundidades, que recolectan las partículas que se hunden (la denominada nieve marina). Más sofisticados son los vehículos submarinos robotizados (ROVs), o los sumergibles operados a distancia o con personal a bordo. En la página siguiente aparecen algunos de estos vehículos que pueden acceder incluso a las fosas más profundas.

En cualquier caso, el trabajo experimental con muestras de agua profunda es complicado por la dificultad de reproducir las condiciones in situ de la presión hidrostática. La mayor parte de las estimaciones de metabolismo microbiano están realizadas sobre muestras descomprimidas, y es muy probable que estas difieran sobre las que se dan en condi-

ciones naturales, como parecen indicar los escasos resultados obtenidos con sistemas de muestreo que mantienen la presión hidrostática. La utilización de cámaras de vídeo incorporadas a las rosetas ha permitido apreciar que el océano oscuro no se parece en nada al agua pura, sino que contiene infinidad de partículas, con tamaños que oscilan entre pocas micras y varios centímetros, y que en algunos casos se acumulan en interfases de densidad entre masas de agua, donde la actividad microbiana de consumo de oxígeno es mayor.

A pesar de lo llamativos que resultan los habitantes vertebrados e invertebrados del océano profundo, la mayor biomasa y diversidad corresponde a los organismos procariotas (bacterias y arqueas). Estos últimos son responsables del grueso de la actividad metabólica y por ende de la biogeoquímica global



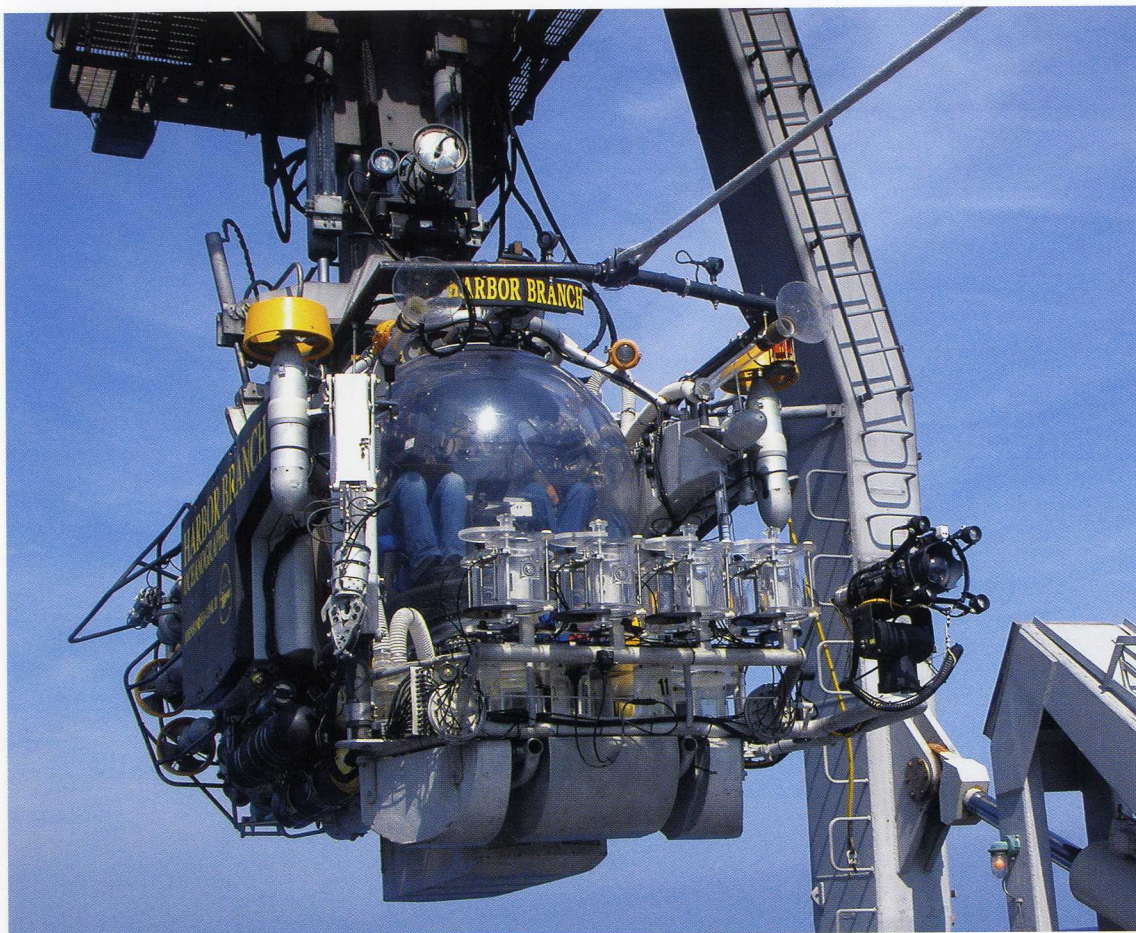
▲ Pez migrador del océano profundo.

del océano oscuro. Comparadas con las aguas superficiales, las bacterias del océano oscuro suponen el 75 por ciento de la biomasa y aproximadamente la mitad de la actividad total del océano.

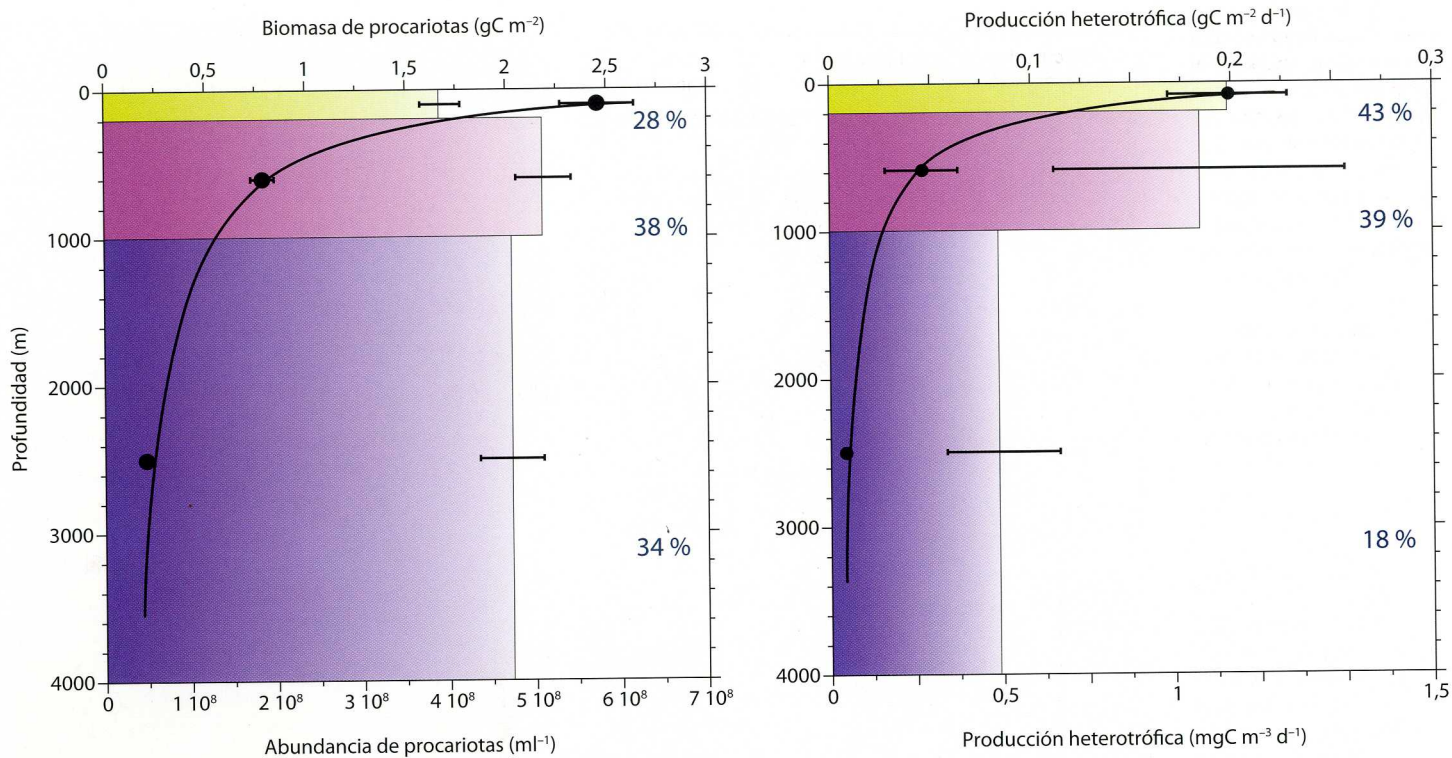
La mayor parte del carbono orgánico que resulta de la fotosíntesis en la zona epipelágica es respirado en la zona mesipelágica por los procariotas y, por tanto, puede retornar a la atmósfera en forma de dióxido de carbono en meses o años. Sin embargo, una parte del carbono orgánico escapa de la degradación y llega a la zona batipelágica, donde tarde o temprano será respirado, quedando secuestrado

en forma de CO_2 durante siglos, hasta que la lenta circulación termohalina de las aguas profundas lo vuelva a llevar a la superficie. En todo caso, se piensa que alrededor de un tercio de la respiración global del océano tiene lugar en el océano oscuro.

Hasta hace poco se suponía que la mayor parte de los procariotas del océano oscuro vivían libres en el agua. Sin embargo, estudios recientes basados en genómica de aislados y en metagenómica de muestras naturales cuestionan esta imagen, y sugieren que los microorganismos se encuentran asociados a partículas, probablemente de pequeño tamaño,



◀ Dos sumergibles oceanográficos, el *Johnson Sea-Link II* de la Harbor Branch Institution y el *Shinkai 6500* del JAMSTEC que puede descender a 6.500 metros, de ahí su nombre.



con tasas de sedimentación despreciables: la denominada materia orgánica particulada en suspensión. Se suele distinguir entre materia orgánica que está a disposición de los organismos, fresca y compuesta de monómeros fácilmente utilizables, y la más antigua, refractaria a la degradación y normalmente de alto peso molecular.

En general, los polímeros suelen ser más abundantes (cerca del 90 %) que los monómeros, y las bacterias y arqueas del océano profundo deben sintetizar enzimas especializadas en la rotura de estas moléculas antes de poder incorporarlas y usarlas. Las actividades de estas enzimas aumentan con la profundidad, al menos de forma relativa, y también aumentan las eficiencias de crecimiento de las bacterias, de forma que aquellas que habitan el océano profundo suelen «gastar» más energía en el mantenimiento de sus estructuras celulares y en sintetizar enzimas, que las que habitan la superficie del océano. Esta observación coincide con el hecho de que los genomas de los aislados de los fondos marinos tienden a ser característicos de bacterias que no han reducido su genoma sino que, por el contrario, tienen un buen repertorio de maquinaria bioquímica que les permite usar múltiples tipos de materia orgánica.

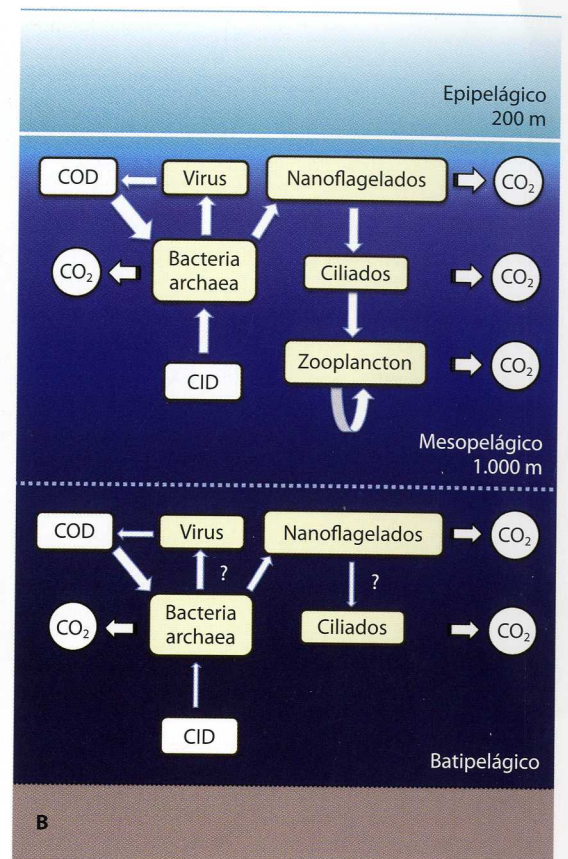
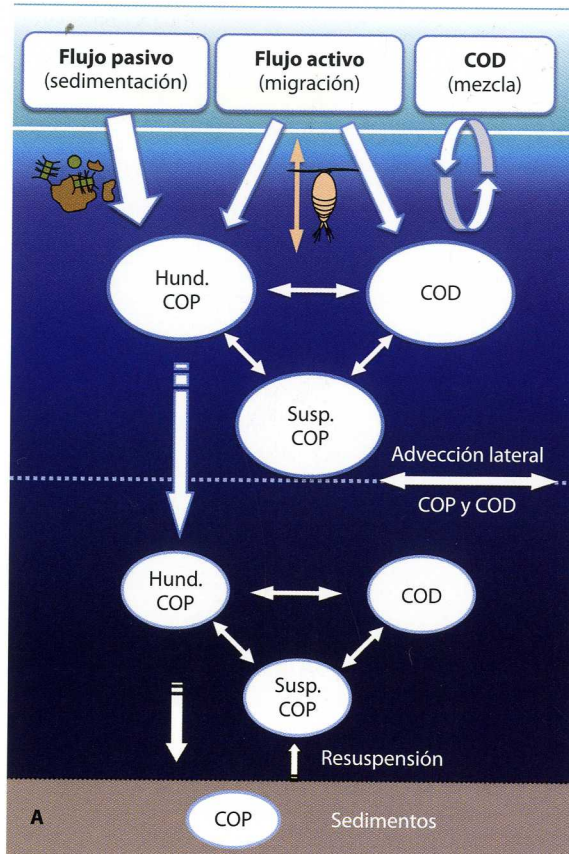
La presencia de esta maquinaria generalista sugiere que la materia orgánica no solo procede de partículas formadas en superficie, que o bien se hundían hacia el fondo por su propio lastre o son transportadas por procesos de mezcla vertical inten-

sa. Es posible también que existan zonas de producción primaria en el propio océano oscuro, y zonas de acumulación de materia particulada en suspensión, entre interfases de masas de agua, que proceda de los márgenes continentales. La fijación quimioautotrófica de carbono inorgánico se da en el océano oscuro por acción de bacterias oxidadoras de amonio, hidrógeno o N_2O , pudiendo representar hasta un 50 por ciento de la producción del fitoplancton que se exporta al océano oscuro.

El esquema de la página siguiente sintetiza nuestro conocimiento actual de la biogeoquímica del carbono en las aguas profundas: el carbono orgánico disuelto lábil y semilábil –que es el sustrato primario de las comunidades de procariotas– se hace disponible principalmente a través de la transformación y disolución de las partículas, en lugar de llegar por exportación directa de carbono orgánico disuelto desde las aguas superficiales. Tanto los microorganismos como el zooplancton y los peces pequeños migradores participan en la destrucción y transformación de las partículas, determinando la magnitud de la exportación de carbono orgánico disuelto desde las aguas superficiales. Las pequeñas partículas suspendidas pueden originarse por la transformación de otras de mayor tamaño, aunque a su vez pueden agregarse y constituir partículas mayores que se sedimentan. En general, el material suspendido parece ser más lábil que el particulado y probablemente ofrezca un buen sustrato para el crecimiento bacteriano, aun-

▲ Distribución por capas de la abundancia de bacterias y arqueas, su biomasa y la producción heterotrófica total, también por capas (epipelágico en amarillo; mesopelágico en rojo, y batipelágico en color violeta). Los porcentajes se refieren a los valores integrados.

► Representación esquemática de A) los flujos de materia orgánica, y B) las redes tróficas en la zona mesopelágica y batipelágica del océano oscuro. A) Se indican tres reservorios de carbono orgánico disuelto: el disuelto (COD), el particulado que sedimenta (COP) y el particulado en suspensión (susCOP). Tanto el COD como el susCOP son susceptibles de transporte lateral. El flujo de carbono hacia el océano profundo se realiza por sedimentación pasiva de COP, mezcla vertical de COD, o transporte activo de COD y COP mediado por zooplankton migrador. B) Las bacterias y arqueas pueden incorporar COD (heterotrofia) o también carbono inorgánico disuelto (CID, quimiosíntesis). En el mesopelágico la fijación autotrófica representa entre un tercio y la mitad de la heterotrofia. La lisis vírica y la alimentación por flagelados y ciliados controlan a los procariotas en el mesopelágico. En el batipelágico, el papel de los ciliados es más discutible. En el mesopelágico, la carnivoría por el zooplankton migrador contribuye a los flujos de carbono (Figura sacada de Aristegui *et al.*, 2009).



que la capacidad de degradación de las partículas dependerá de la presencia de formas inorgánicas de nitrógeno y fósforo, que aumentan la eficiencia de remineralización bacteriana.

Los descubrimientos recientes que presentan un océano profundo heterogéneo y dinámico, con un metabolismo microbiano relativamente alto, y con procesos complejos de transformación y remineralización de materia orgánica, contrastan con la idea original que se tenía a finales del siglo XIX:

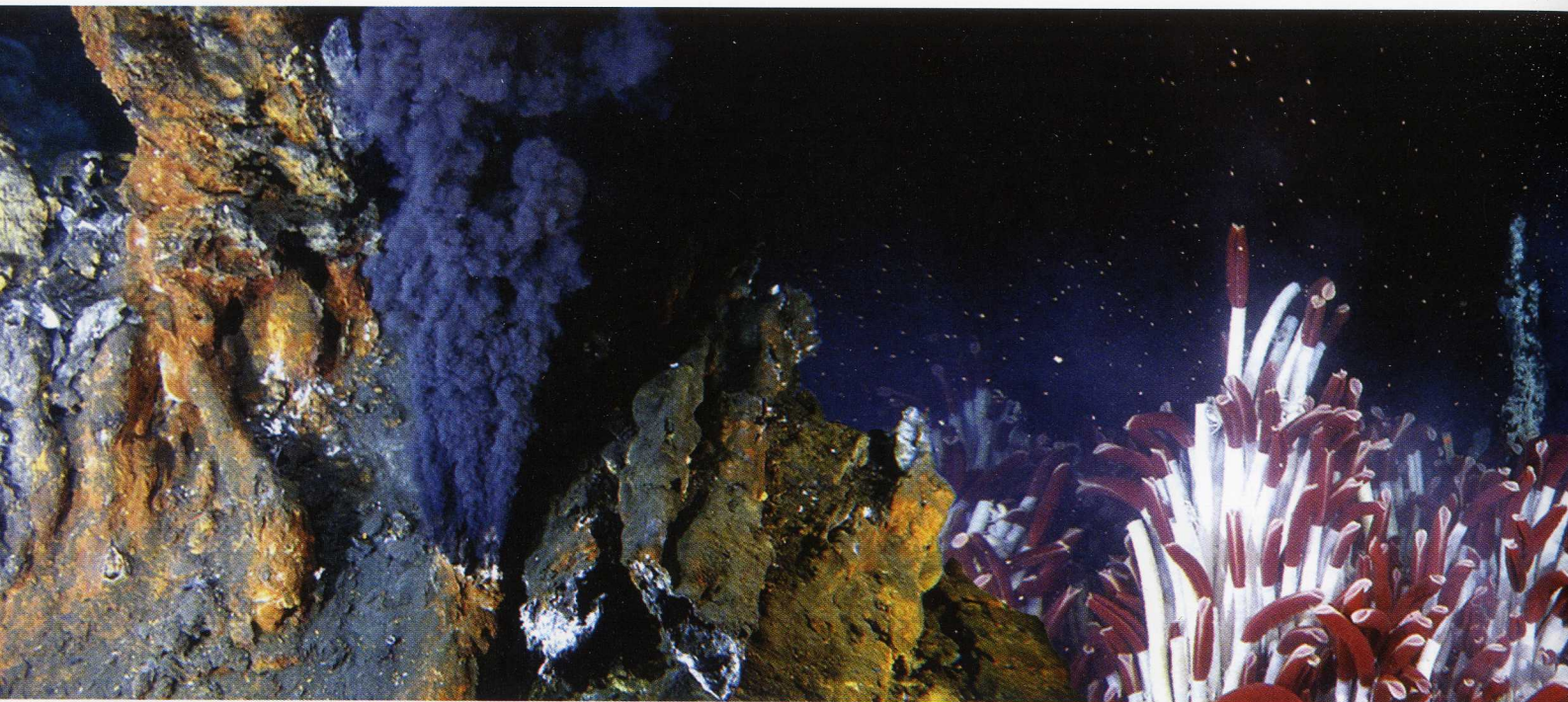
[...] En las profundidades abisales la vida debe de ser muy monótona. No habrán estaciones, días, noches o cambios de temperatura. Es posible que en algunas zonas haya una variación periódica en la cantidad de comida que cae desde arriba; algo que quizá provoque un poco de animación anual entre sus moradores.⁶

Un siglo después, el estudio del océano profundo adquirió gran relevancia con el descubrimiento en 1977 de densas y prósperas poblaciones de invertebrados en *fuentes hidrotermales* a unos 2.600 metros de profundidad. Pronto se dedujo que diversos tipos de bacterias –que vivían simbióticas de otros organismos– ejercían el papel de productores primarios, mediante procesos quimiosintéticos, utilizando compuestos inorgánicos reducidos que

acompañaban al flujo de materiales que salía de las fuentes hidrotermales. Esta fuente de materia orgánica alimentaba toda una comunidad de metazoos, incluyendo moluscos, crustáceos y vertebrados.

Los procesos de quimiosíntesis en las fuentes hidrotermales los llevan a cabo bacterias quimiolitotóxicas, similares a las que se encuentran también en fuentes termales de la superficie de la tierra (por ejemplo, géiseres, fumarolas, aguas termales). Sin embargo, en ningún otro ecosistema el proceso es suficientemente intenso como para mantener redes tróficas tan complejas como en las fuentes hidrotermales. Probablemente, la simbiosis bacterias-metazoos permite un paso directo y eficiente de materia orgánica desde el origen de la producción (las bacterias) al consumo (el metazoo).

Las fuentes hidrotermales se encuentran en zonas de vulcanismo activo en el Atlántico, Índico y Pacífico, donde las placas de la litosfera se separan. Al aflorar la lava que escapa del subsuelo se enfría, se contrae y se abre, de forma que el agua de mar penetra hacia el interior de la Tierra. El agua reacciona con el manto basáltico a altas presiones y temperaturas y se convierte en un fluido ácido, muy reducido, con gran abundancia de metales, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno (H₂S). Este fluido se escapa por las aberturas de la lava solidificada y entra en contacto con



el oxígeno del agua de mar. A menudo precipitan sulfatos de calcio que dan origen a chimeneas por donde sale el agua caliente (hasta 350°C) cargada de sustancias reducidas, que le confieren un tono oscuro. Entre el punto de salida de la chimenea y el agua del mar se forman gradientes de temperatura, de metales reducidos y de H₂S. En aquellos lugares donde coexisten H₂S y oxígeno, las bacterias quimio-litoautótrofas pueden degradar el primero y usar sus electrones en el proceso de respiración aeróbica (es decir, consumiendo O₂) para fijar CO₂.

Para estudiar este tipo de ecosistemas los sumergibles y los submarinos robotizados son imprescindibles, no solo para poder acercarse a las fuentes calientes, sino para poder muestrear con precisión un ambiente estructurado pero poco sólido. Por ejemplo, las aguas turbias de las fuentes del Galápagos Rift (00°47'N, 86°08'W) contienen de 10⁶ a 10⁹ células procariotas por mililitro. Estos organismos también forman mantos en el sedimento, de los cuales se alimenta un peculiar pez de color morado, el *Bythites hollisi*, dando origen a una cortísima cadena trófica de solo dos eslabones. De esta y otras fuentes hidrotermales se han aislado bacterias y arqueas con capacidad de reproducirse a altas presiones y temperaturas (por ejemplo, *Methanococcus jannaschiae* con crecimiento óptimo a 86°C y tiempos de duplicación de 26 minutos).

Los invertebrados dominantes alrededor de las fuentes son los mejillones (*Calyptogena magnifica*) y los gusanos de tubo gigantes (*Riftia pachyptila*).

Todos tienen bacterias simbiotas; a veces incluso hospedan diversos tipos de bacterias que operan bioquímicamente de forma diferenciada (por ejemplo, metanógenas y reductoras de sulfato). Los gusanos alcanzan grandes dimensiones (hasta 2,5 metros de longitud) y carecen de boca e intestino. En las «agallas» se produce el intercambio de gases con el exterior. Dado que los simbiotes necesitan de oxígeno y sulfhídrico simultáneamente, poseen un eficiente sistema de transporte de gases, basado en la hemoglobina. El 50 por ciento de su cuerpo consiste en un tejido esponjoso donde se encuentran las bacterias simbiotas que pueden llegar a constituir hasta el 75 por ciento del peso del animal. Estudios moleculares sugieren que suele haber un solo tipo de simbiote por especie animal.

Existen muy diversos tipos de fuentes hidrotermales en los que varía tanto su estructura geológica como sus propiedades químicas, lo que facilita que las comunidades de organismos asociados sean también diversas; con bacterias y arqueas usando metabolismos dispares, y con metazoos de tipos muy diferentes alimentándose de ellas. Las fuentes hidrotermales no son, sin embargo, el único ambiente «exótico», y a la vez de gran interés biogeoquímico, evolutivo y de biodiversidad, que puede encontrarse en el océano profundo. Los volcanes de fango que se encuentran en el sudeste del Mediterráneo (como el domo de Nápoles o el volcán de fango Olimpo) llevan asociadas fuentes frías que se forman en zonas de sedimentos, donde algunos pro-

▲ Imagen de una fuente hidrotermal del océano profundo, con una fumarola (izquierda) y un grupo de gusanos de tubo gigantes (derecha).

cariotas producen metano como producto de desecho. Este metano se libera del sedimento en forma de pequeñas burbujas, lo que es aprovechado por otras bacterias para su crecimiento. Por otro lado, suele observarse grandes mantos de color blanco de bacterias oxidantes de azufre, del género *Beggiatoa*.

Otros ambientes especiales son las *cuenclas hipersalinas y anóxicas*; particularmente importantes en el mar Mediterráneo y el mar Rojo (por ejemplo, L'Atalante, Bannock, Discovery, Urania, Kebrit Deep o el Shaban Deep). Se encuentran en las regiones más profundas (a más de 3.000 metros) de la cuenca de evaporación durante el período Messiniano (hace 5-8 millones de años), cuando el Mediterráneo se secó casi por completo y quedaron llenas de evaporitas, que luego se redisolieron en el mar. Sus ecosistemas se caracterizan por salinidades muy elevadas (160-300 por mil), alta presión hidrostática y anoxia. La alta salinidad impide la mezcla de sus aguas con el agua de mar externa, por lo que los ambientes han quedado aislados del resto del océano durante millones de años. Contienen una diversidad bacteriana peculiar, e incluso se han identificado nuevos organismos eucariotas muy especializados que viven en anaerobiosis.

Todos estos hábitats especiales tienen una gran relevancia desde el punto de vista de la biogeoquímica y la diversidad marina, a pesar de su reducida extensión comparados con la inmensidad de los fondos oceánicos. Constituyen ecosistemas singulares y se les ha denominado «la última frontera de

la vida», por las condiciones extremas en las que crecen los organismos. Sin embargo, podría decirse que constituyen también la «primera frontera de la vida», porque el origen de la vida en nuestro planeta se produjo probablemente en condiciones muy similares a las que habitan los microorganismos de estos ambientes.

► **Postscriptum**

Dedicamos este trabajo a la memoria de nuestro amigo y colega Francesc Pagès, pionero en el estudio de las formas de vida del océano profundo, y uno de los primeros oceanógrafos españoles que bajó en un submarino hasta las profundidades oceánicas. Pocos como él supieron transmitir la belleza de los organismos que pueblan este ambiente, que no hace tanto se consideraba desprovisto de vida.

Agradecemos a Josep-Maria Gili, Gerhard Herndl, Alexander Bochdansky, Anne-Loise Reysenbach y Álvaro Roura el permitirnos sus imágenes.

Notas

1. Véase la página web del proyecto CeDAMar (<http://www.cedamar.org/>) o este bestiario del reino abisal (<http://www.pbs.org/wgbh/nova/abyss/life/bestiar.html>).
2. <http://www.eurocoml.org/public/publications/deeper-than-light>.
3. Frank Schätzing. 2006. *El quinto día*. Editorial Planeta.
4. Edward Forbes. 1859. *The Natural History of the European Seas*. John van Voorst, «Londres».
5. <http://www.whoi.edu/page.do?pid=10737>
6. Henry N. Moseley, *Nature*. April 22, 1880, p. 592.