

Temas de actualidad

El planeta simbiótico: Contribución de los microorganismos al equilibrio de los ecosistemas

Ricardo Guerrero¹ y Mercedes Berlanga²

¹Departamento de Microbiología y ²Departamento de Microbiología y Parasitología Sanitarias, Universidad de Barcelona.

E-mail: guerrero@retemail.es

La visión global de la Tierra

El 21 de diciembre de 1968, a bordo de la nave espacial *Apollo VIII*, tres astronautas, James A. Lowell, Frank Borman y William Anders, iniciaban el primer vuelo orbital de la Luna. Mientras sus compañeros fijaban su atención en nuestra hija del espacio, objetivo de la misión, el jefe de la tripulación, Lowell, observaba en cambio el punto desde donde habían partido, su casa. Con su pulgar tapaba la vista desde la escotilla y observaba cómo todas las cosas que él quería, todas las que le preocupaban, toda la conflictiva sociedad del 68, con sus esperanzas y posteriores renunciadas, quedaban ocultas por un simple movimiento de su mano. Tres días después, el mismo Lowell tomó la fotografía más impresionante que jamás se haya realizado: no era la "salida del Sol", ni siquiera "la salida de la Luna", sino otra "salida" nunca vista antes por un humano, *su* propia Tierra -la nuestra, la única que tenemos- suspendida en el espacio y emergiendo sobre el horizonte lunar (Fig.1).

La superficie de nuestro planeta ha cambiado como respuesta a la vida que se desarrolla sobre ella, del mismo modo que la propia vida ha cambiado en respuesta a la evolución de la Tierra. La biosfera es muy antigua. La Tierra viva tiene casi cuatro mil millones de años, sólo unos setecientos millones de años menos que el propio planeta como entidad independiente de su (m/p)adre, el Sol (es decir, hace unos 3.850 millones de años). El origen de la vida, o biopoyesis, pudo producirse en nuestro planeta, varias veces, hace unos 3.850 millones de años. Las características de los dos planetas más cercanos al nuestro, Venus y Marte, podrían haber permitido el desarrollo de vida en esa época. Si la biopoyesis se produjo en Venus y Marte en algún momento de su historia "geológica", posiblemente no continuó en ninguno de los dos. Lo que hizo posible el mantenimiento de la vida en la Tierra fue el desarrollo de los ecosistemas, o ecopoyesis, que evitó el agotamiento de los elementos biogénicos de la superficie del planeta, cosa que habría pasado en un tiempo

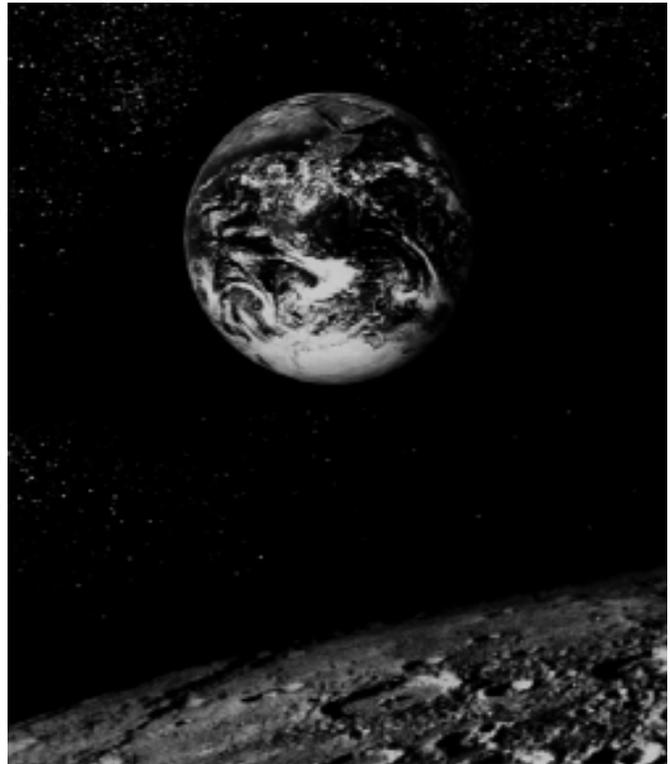


Figura 1. La Tierra vista desde la Luna.

máximo de 200 o 300 millones de años y que habría provocado la extinción primigenia de la vida (es decir, hace unos 3.550 millones de años). La actividad de estos ecosistemas determinó la evolución posterior del planeta, que hasta aproximadamente 1.800 millones de años tuvo como únicos habitantes los procariotas (Guerrero *et al.*, 2002) (Fig. 2).

Desde el punto de vista de la termodinámica, un ecosistema es un sistema abierto, muy alejado del equilibrio, y tiene tres componentes: los seres vivos, los productos químicos de su metabolismo y el ambiente fisicoquímico, que es modificado por la actividad de los propios (micro)organismos. Los organismos se necesitan unos a otros para obtener alimento y eliminar los residuos sólidos, líquidos o gaseosos. Ninguna especie puede reciclar los productos de su metabolismo. Todos los seres

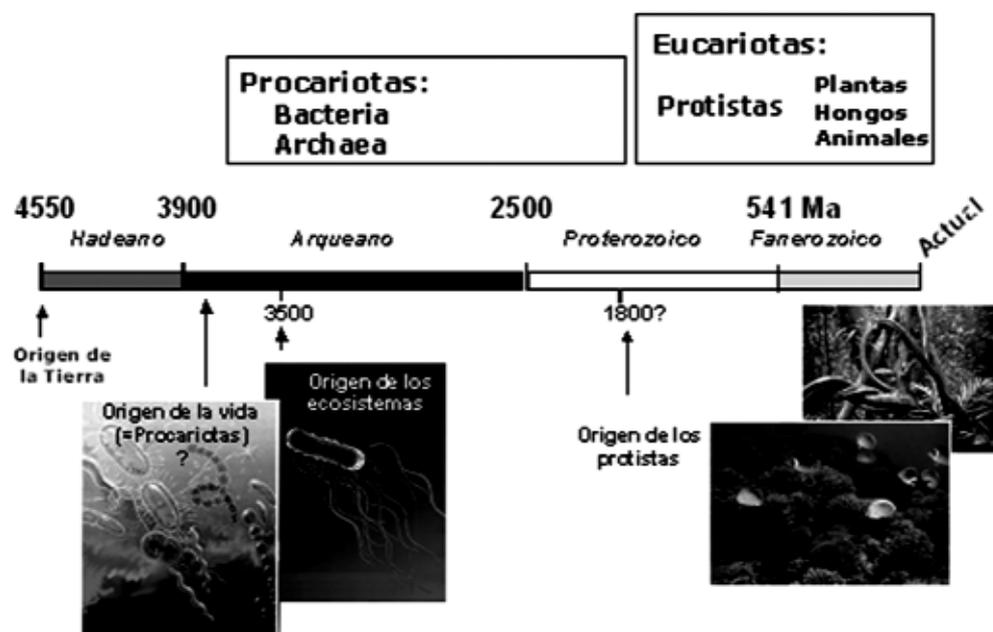


Figura 2. Historia de la Tierra y de la vida.

vivos extraen uno o más gases de la atmósfera y emiten otros. Estos fenómenos producen un efecto global acumulativo en el planeta.

Un rasgo distintivo de la Tierra es la presencia de agua líquida en abundancia, algo que no se observa actualmente en Venus y Marte. La composición química de las atmósferas de los planetas Venus, Tierra y Marte sería similar cuando los tres eran jóvenes. Las de Venus y Marte continúan siendo similares entre ellas en la actualidad. Las

anomalías observadas en la Tierra son el resultado de la presencia de vida durante unos 3.850 millones de años. La atmósfera actual de la Tierra contiene un 21% de oxígeno. Dicha proporción es constante y adecuada para la vida: si descendiese hasta el 15%, la vida de animales y plantas sería imposible; y si aumentase hasta el 25%, se produciría la combustión espontánea de muchos bosques. El CO₂, que en Venus y Marte constituye cerca del 95% de la atmósfera, casi ha desaparecido de la atmósfera terrestre, donde se

encuentra en un 0,036% (Tabla 1). El CO₂ se encuentra principalmente en la Tierra disuelto en el agua o en forma sólida (dando carbonato cálcico, o caliza).

La energía fluye a través de todos los ecosistemas de la Tierra, pero la materia es reciclada por los miembros de las poblaciones residentes. Aunque la Tierra funciona de manera bastante similar desde el principio de la vida, obviamente ha habido cambios. Por ejemplo, la aparición de

Tabla 1. Algunas características fisicoquímicas de tres planetas interiores del Sistema Solar.

	Venus	Tierra (sin vida) ^a	Tierra (con vida)	Marte
Diámetro (×10 ³ km)	12,104	12,756	12,756	6,794
Masa (×10 ²⁷ g)	4,8689	5,9742	5,9742	0,64191
Densidad (g × cm ⁻³)	5,24	5,52	5,52	3,93
Distancia media del Sol (×10 ⁶ km)	108,2	149,6	149,6	227,9
Período sideral (días)	224,7	365,3	365,3	686,9
Presión (atm)	90	60	1	0,0064
Temperatura media (K)	750	563	286	220
Agua (m) ^b	0,003	0,01	3000	0,00001
Dióxido de carbono, atmósfera (%)	98	98	0,03	95
Nitrógeno, atmósfera (%)	1,7 ^c	1,9	79	2,7 ^d
Oxígeno, atmósfera (%)	Trazas ^c	Trazas	21	0,13 ^d
Satélites	0	1	1	2 (muy pequeños)

(a) Diversos datos de esta columna son estimaciones aproximadas.

(b) Estima de la profundidad en metros de agua sobre el planeta si todo el agua se encontrara en estado líquido.

(c) Vehículo espacial *Venera* (ex URSS).

(d) Vehículo espacial *Viking* (EE UU).

oxígeno en la atmósfera que, aunque de origen biológico (fue debido al fotosistema II de las cianobacterias) causó la extinción en masa de muchas especies anteriores. Pero las estrategias ecológicas han sido similares a lo largo de la vida; lo que ha cambiado han sido los taxones que las realizan. G. Evelyn Hutchinson (1903–1991) observó que los actores (en nuestro caso, los microorganismos), pueden cambiar de un teatro (hábitat) a otro, pero que la representación en el escenario (procesos fisiológicos) será igual para la misma obra (un ambiente determinado, unas relaciones específicas).

La tenacidad de la vida

El origen de las células (de la vida) a partir de compuestos químicos inertes podría haber tenido lugar una o varias veces. En cualquier caso, las primeras células de nuestro linaje fueron sistemas proteicos limitados por membranas, basados en el RNA y DNA y dotadas de autopoyesis (automantenimiento). Intercambiaban constantemente sus materiales constituyentes con el medio externo. Daban salida a los residuos a medida que adquirían alimento y energía. Nuestro DNA proviene, a través de una secuencia ininterrumpida, de las mismas moléculas que están presentes en las células primitivas que se formaron en las orillas de los primeros océanos de aguas cálidas y poco profundas. Existe un lazo íntimo entre la evolución y los organismos. La evolución conecta la vida a través del tiempo, y como en todo proceso evolutivo, los organismos y sistemas posteriores no pueden prescindir de los organismos y sistemas que los han precedido.

La vida en la Tierra adopta múltiples formas y tamaños, desde los microorganismos y plantas microscópicas hasta las secuoyas, ballenas, o los seres humanos. El conjunto de organismos y su dotación genómica constituyen la biodiversidad del planeta. El investigador Bruce Paster (del *Forsyth Institute* de Boston) ha calculado que en la boca de una persona puede haber ¡hasta 700 especies de bacterias o incluso más! (Paster *et al.*, 2001). La diversidad microbiana es todavía poco conocida, en primer lugar porque sólo se ha identificado (o cultivado) una mínima parte (entre el 1% y el 0,01%) de las especies de microorganismos existentes. En segundo lugar, porque en los microorganismos procariontes los criterios para su identificación no se basan solamente en características morfoquímicas, sino que intervienen otras de tipo molecular y ecológico (Moreno *et al.*, 2002). En cualquier caso, el estudio de la biodi-

versidad de un determinado ecosistema (un bosque, un lago, un mar) estaría incompleto sin la inclusión de los microorganismos, ya que ellos contribuyen de manera esencial al funcionamiento global del planeta y al desarrollo sostenible de la biosfera.

A lo largo de sus más de 3.800 millones de años de historia, la vida se ha enfrentado al menos con treinta grandes catástrofes ecológicas. Los principales cambios en la superficie del planeta y en la composición de su atmósfera han causado la extinción en masa de muchas especies. Desde tiempos tan recientes como el principio del Cámbrico (hace sólo 541 millones de años) ha habido cinco grandes extinciones. Sin embargo estas extinciones no han sido nunca una amenaza para el conjunto de la biosfera. La vida, especialmente la vida bacteriana, es en extremo resistente y ha demostrado un gran poder de adaptación, nutriéndose desde el principio del desastre y la destrucción, y recuperándose de cada crisis con renovado vigor. El "éxito" de los microorganismos se basa en tres características principales: tamaño pequeño, que les permite una elevada capacidad de dispersión; variabilidad y flexibilidad metabólica, que les permite tolerar y adaptarse rápidamente a condiciones ambientales desfavorables; y plasticidad genética (o capacidad de transferencia horizontal de genes), que les permite recombinar y recoger caracteres positivos y persistir durante largo tiempo adaptándose a las condiciones ambientales cambiantes. La vida microbiana podría ser una ineludible consecuencia de la evolución planetaria, una continuación del desarrollo físico del Universo. Desconocemos lo que nos depara el futuro. Pero mientras que todas las especies tienden a extinguirse, las grandes agrupaciones (reinos, dominios) perduran. No hay ninguna razón para pensar que nuestra especie no desaparezca del planeta, lo que si se puede asegurar es que la vida, la vida microbiana, sobrevivirá hasta que el Sol se convierta en una estrella gigante roja y su fotosfera macilenta alcance la órbita de Marte, antes de extinguirse (Guerrero, 1998). Pero para eso faltan unos 5.000 millones de años.

Los microorganismos, componentes imprescindibles de los ecosistemas

Dos enzimas esenciales para la vida, la rubisco y la nitrogenasa son exclusivamente procariontes y cumplen una función primordial en los ciclos biogeoquímicos (Fig. 3). La rubisco (ribulosa bisfosfato carboxilasa oxilasa), enzima responsa-

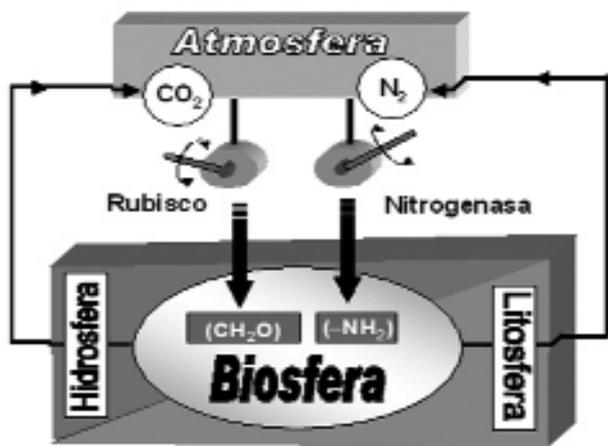


Figura 3. Dos enzimas procarióticas esenciales, rubisco y nitrogenasa, controlan la entrada del carbono y del nitrógeno, respectivamente, en la biosfera.

ble de coger el CO_2 de la atmósfera o del agua y juntarlo a una pentosa, para fabricar nuevo alimento. La encontramos en las bacterias fotosintéticas oxigénicas, las fotosintéticas anoxigénicas rojas del azufre, muchos quimiolitotrofos y en unos corpúsculos de la célula eucariótica, los cloroplastos de las algas y plantas. Los cloroplastos tienen DNA, RNA y ribosomas propios. Su DNA presenta una homología del 95% con algunos grupos de cianobacterias (o cianoprocariontas, término propuesto por el Prof. Xavier Llimona, del Departamento de Botánica de la Universidad de Barcelona). Los cloroplastos son cianobacterias que han establecido una endosimbiosis permanente. Sin lugar a dudas, la rubisco es un enzima procariótica que ha pasado a la célula eucariota por endosimbiosis. Posiblemente, es una de las enzimas más abundantes en la naturaleza.

La nitrogenasa utiliza el nitrógeno atmosférico para la formación de aminoácido. Esta enzima sólo funciona en condiciones anóxicas, y es exclusiva del mundo procariótico (bacterias y arqueas). Desgraciadamente, no ha pasado por

endosimbiosis a la célula eucariota. Este hecho seguramente se debe a que la nitrogenasa no puede funcionar en presencia de la gran cantidad de oxígeno que hay habitualmente en la célula eucariótica. Los procariotas que tienen nitrogenasa activa han desarrollado diferentes estrategias para evitar que el oxígeno inhiba la acción de la enzima.

Los microorganismos fijadores de nitrógeno pueden ser de vida libre o formar simbiosis, por ejemplo con plantas leguminosas, principalmente (también lo hacen con plantas no leguminosas, como *Coriaria* o *Alnus*, el aliso). En el ciclo del nitrógeno es imprescindible la presencia de un procariota que fije N_2 .

Otra contribución imprescindible de los procariotas en el ciclo del nitrógeno recientemente observada es la oxidación anaeróbica del amonio (metabolismo denominado anamox). La anamox implica la oxidación de amoníaco con nitrito como aceptor de electrones, obteniendo nitrógeno gaseoso. *Brocadia anammoxidans* es el organismo que cataliza la anamox mejor conocida (Fig. 4) (Jetten *et al.*, 2002). Los análisis filogenéticos de rRNA 16S muestran que estas bacterias están muy relacionadas con el filum *Planctomycetes*. Los planctomicetes son una rama especial del dominio Bacteria, que carecen de peptidoglicano y que contienen en el citoplasma compartimentos rodeados por membranas, entre los que se encuentra

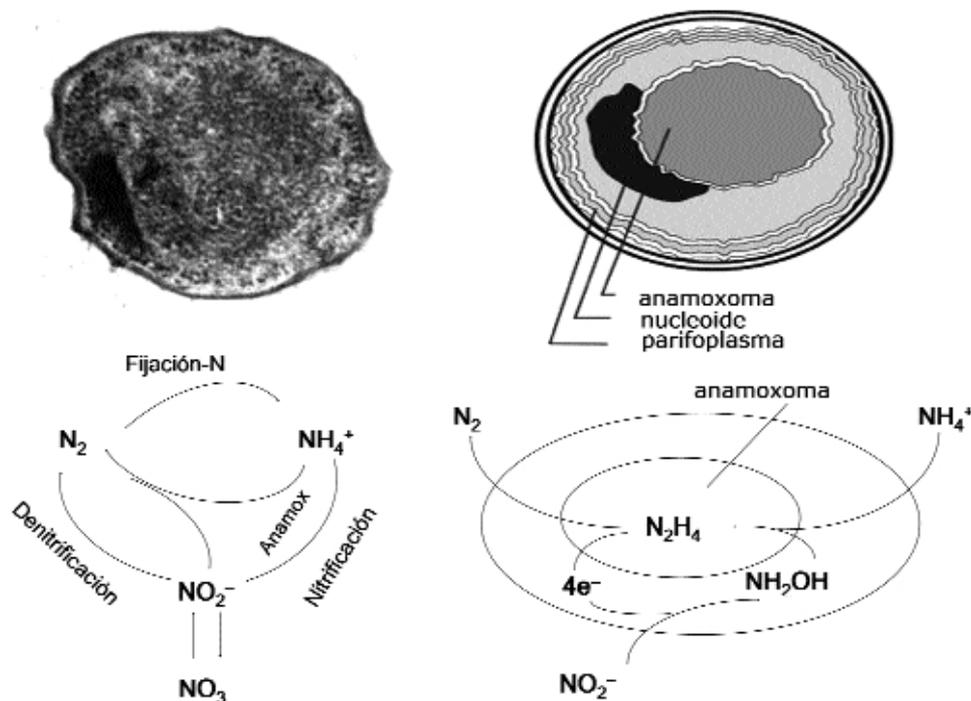


Figura 4. Un nuevo metabolismo procariótico: la oxidación anaeróbica del amonio, o anamox. La bacteria de la izquierda es *Brocadia anammoxidans*.

una estructura análoga al núcleo de las células eucariotas (Lindsay *et al.*, 2001). La disponibilidad de nitrógeno fijado (nitrato, nitrito y amonio) limita la productividad en muchas zonas oceánicas. La conversión de nitrato a N_2 por las bacterias heterotróficas (desnitrificación) se creía que era la única vía de metabolización importante del nitrógeno inorgánico fijado. Sin embargo, en el mar Negro (que, recordemos, es uno de los pocos mares con abundante anoxia en la Tierra actual) se ha observado el nuevo fenómeno de la anamox. El importante consumo de amonio en las zonas subóxicas, indica que la anamox puede ser muy importante en el ciclo del nitrógeno en los océanos (Kuypers *et al.*, 2003).

Ecosistemas mínimos

Ecosistema es un término acuñado por el botánico inglés Arthur Tansley (1871–1955) en 1935, como una unidad organizada que comprende todos los organismos vivos presentes en un área definida, además de los factores fisicoquímicos ambientales (Guerrero *et al.*, 2002). Los ecosistemas presentan un gradiente de potencial redox. Este gradiente está asociado con la distribución vertical de variables tanto ambientales

como biológicas. En aquellas partes del ecosistema en que la luz es la principal fuente de energía, las comunidades biológicas normalmente están estratificadas horizontalmente, debido a la extinción de la luz con la profundidad. Los bosques tropicales, las comunidades fotosintéticas planctónicas de lagos estratificados y los tapetes microbianos se pueden considerar formas análogas a diferente escala (metros en los bosques, centímetros en lagos, milímetros en los tapetes microbianos) (Fig. 5). En todos ellos encontramos organismos autótrofos y heterotróficos. Los autótrofos, productores, utilizan la energía bien de la luz (fotótrofos), bien de las reacciones químicas (quimiotrofos), y fabrican los nutrientes a partir de sustancias inorgánicas como CO_2 y NO_3^- . Los organismos heterótrofos son consumidores y utilizan los productos sintetizados por los autótrofos. La clasificación ecológica de los componentes bióticos de un ecosistema se expresa en términos de fisiología y metabolismo si hablamos de organismos procariontes (la clasificación depende de la función que desempeñan en el ambiente [gremios] más que en la especie), mientras que en los eucariotas se expresa en términos de estructura y comportamiento (Nealson *et al.*, 2002).

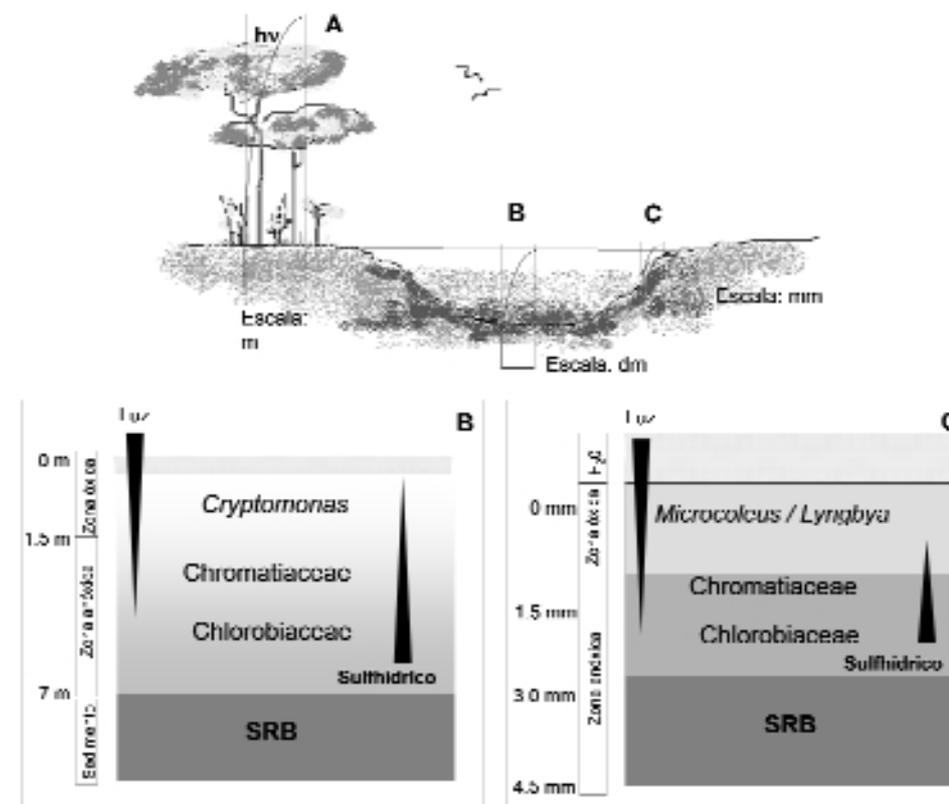


Figura 5. Ecofisiología comparada: diferentes ecosistemas pero igual estrategia: (A) bosque, (B) lago cárstico, (C) tapete microbiano costero (Guerrero *et al.*, 2002).

Los tapetes microbianos son los ecosistemas más antiguos de la historia de la vida. Aparecen en los bordes de los continentes y en muchas zonas húmedas interiores desde hace 3.500 millones de años. Un tapete microbiano es una comunidad microbiana multilaminada. La laminación es resultado de la extinción de la luz y de los gradientes fisicoquímicos, principalmente los de sulfuro y redox. Estos ecosistemas están constituidos por organismos fototróficos y quimiotróficos aeróbicos y anaeróbicos, junto con numerosos microorganismos heterótrofos (Guerrero y Mas, 1989). Son comunidades coordinadas funcionalmente. De hecho, los tapetes se parecen a los tejidos de células eucariotas de un “macroorganismo” por la cooperatividad

funcional y además por estar protegidos de las "condiciones variables" ambientales mediante una primitiva homeostasis proporcionada por una matriz de exopolisacárido (Costerton *et al.*, 1995).

Sus restos calcificados originaron las estructuras conocidas como estromatolitos, que, junto con las formaciones de hierro en bandas (BIF, las mayores de las cuales aparecieron hace unos 2.300 millones de años), constituyen las estructuras sedimentarias dominantes de los eones Arqueano y Proterozoico. Los estromatolitos son estructuras sedimentarias laminadas constituidas principalmente de carbonato cálcico. Durante el siglo XIX diversos geólogos citaron estructuras similares, pero sin reconocer su origen biológico. Los estudios realizados a partir de 1954 demostraron que los precursores de los estromatolitos eran unas comunidades constituidas por procariotas. Aunque los estromatolitos son generalmente fósiles, en algunos casos, como en Shark Bay (en la costa noroccidental de Australia) y en las Bahamas (en el Atlántico), continúan activos y puede observarse su crecimiento en la parte superior (cianobacterias), presentando niveles de fotosíntesis y calcificación elevados.

La fuerza de la cooperación

La visión de la evolución como una lucha crónica y encarnizada entre individuos y especies, distorsión popular de la idea darwiniana de la "supervivencia de los mejor dotados", se desvanece con la nueva imagen de cooperación continua, estrecha interacción y mutua dependencia entre formas de vida. La vida no ocupó la Tierra tras un combate, sino extendiendo una red de colaboración por su superficie. Anton De Bary (1831–1888), botánico alemán experto en micología, observó que los líquenes consistían en la unión de un hongo y un alga con mutuo beneficio para ambos. Acuñó la palabra simbiosis (1873) como la vida en común de tipos diferentes de organismos. Actualmente engloba el parasitismo (uno de los organismos sale beneficiado y el otro perjudicado), comensalismo (uno se beneficia, el otro "ni gana ni pierde") y mutualismo (asociación beneficiosa para ambos organismos, como en los líquenes).

El Prof. Douglas E. Caldwell (de la Universidad de Saskatchewan, Canadá) a partir del estudio por ordenador del texto completo del *Origen de las especies* de Darwin (1859), ha analizado un total de 200.000 palabras y ha anotado el número de veces que sale una determinada. Algunos ejemplos: especie (1803), selección (540), individuo (298), perfección (274), raza (132), destrucción

(77), exterminio (58), matar (21). Sin embargo, no sale ninguna vez cooperación, asociación (lo que ahora denominaríamos simbiosis, siguiendo a De Bary), colaboración, interacción, y similares.

La teoría simbiótica del origen y evolución celular se apoya en dos principios biológicos: (i) El mundo vivo está dividido entre organismos procarióticos y eucarióticos (es decir, bacterias-arqueas y el resto de organismos con células nucleadas, protistas, animales, hongos y plantas). (ii) Algunas partes de la célula eucariótica se formaron directamente a partir de asociaciones permanentes de organismos procarióticos distintos. Tres clases de orgánulos (cilios, mitocondrias y cloroplastos) pudieron ser alguna vez bacterias de vida libre (véase Actualidad SEM nº 33 pp. 10–14). La coevolución simbiótica bacteriana condujo a los protistas (célula eucariota). Los animales evolucionaron a partir de algunos protistas (los zoomastigóforos), las plantas a partir de otros (las clorofitas), y los hongos de otros (los quítridos).

Los descendientes de las bacterias que hace tres mil millones de años nadaban en las aguas primitivas respirando oxígeno se hallan actualmente presentes en nuestro cuerpo en forma de mitocondrias. En algún momento, las bacterias ancestrales debieron de combinarse con otros microorganismos, instalándose en su interior y proporcionándoles un sistema de energía procedente del oxígeno a cambio de alimento y protección. Los organismos resultantes de esta unión habrían evolucionado hacia formas de vida más complejas, incorporando la respiración del oxígeno. Este sería un mecanismo evolutivo más brusco que la mutación: una unión simbiótica que llega a ser permanente. La unión de distintos organismos para formar seres colectivos, ha resultado ser la más importante fuerza de cambio sobre la Tierra. La simbiosis como fuente de novedad evolutiva podría explicar la teoría del "equilibrio saltatorio" (*punctuated equilibrium*) propuesta por Niles Eldredge y Stephen J. Gould, en el que mantienen que el registro fósil muestra que la evolución permanece estática la mayor parte del tiempo y que actúa súbitamente: durante breves lapsos de tiempo, dando origen a cambios rápidos en el registro fósil.

Conclusiones finales

Los procariotas son miembros esenciales de la biosfera, componentes indispensables de los ecosistemas que hacen posible el funcionamiento de todos los ciclos biogeoquímicos. Los procariotas están presentes en todos los lugares donde puede existir la vida, ocupando un amplio abanico

co de condiciones ambientales, desde ambientes "ideales" para el crecimiento (ideales para los animales y plantas), hasta ambientes extremos (impensables para los "macroorganismos más evolucionados"). Durante los primeros 2.000 millones de años de evolución fueron los únicos habitantes de la Tierra y prepararon el terreno para el asentamiento posterior de otras formas de vida más complejas. Fueron los inventores de todas las estrategias metabólicas que conocemos. Un error metabólico, la producción de oxígeno, originó la vida aeróbica; uno estratégico, la endosimbiosis, originó la célula eucariota. La evolución avanza siempre por mecanismos necesarios pero indeterminados.

El mantenimiento de la biodiversidad es imprescindible porque, unas veces de forma evidente, otras menos notoria, hay una interacción constante entre las diferentes especies que poblamos el planeta. El mantenimiento de la diversidad de los microorganismos, a veces olvidado, es esencial para la sostenibilidad del planeta y para la diversidad de los "macroorganismos", que seguramente eran los que le preocupaban más a Lowell cuando, a miles de kilómetros distancia, podía tapar la esfera azul de la Tierra con su pulgar.

Referencias

1. Costerton JW, Lewandowski Z, Caldwell DE, Korber DR, Lappin-Scott HM (1995) Microbial biofilms. *Annu Rev Microbiol* 49:711–745.
2. Guerrero R (1998) Crucial crises in biology: life in the deep biosphere. *Int Microbiol* 1:285–294.
3. Guerrero R, Mas J (1989) Multilayered microbial communities in aquatic ecosystems: growth and loss factors. En: Cohen Y, Rosenberg E (Eds.) *Microbial mats: physiological ecology of benthic microbial communities*. American Society for Microbiology, Washington, DC, pp 37–51.
4. Guerrero R, Piqueras M, Berlanga M (2002) Microbial mats and the search for minimal ecosystems. *Int Microbiol* 5:177–188.
5. Jetten MSM y treinta y dos autores más (2002) Improved nitrogen removal by application of new nitrogen cycle bacteria. *Rev Environ Sci Biotech* 1:51–63.
6. Kuypers MMM, Sliemers AO, Lavik G, Schmid M, Jørgensen BB, Kuenen JG, Damsté JSS, Strous M, Jetten MSM (2003) Anaerobic ammonium oxidation by anammox bacteria in the Black Sea. *Nature* 422:608–611.
7. Lindsay MR, Webb RI, Strous M, Jetten MSM, Butler MK, Forde RJ, Fuerst JA (2001) Cell compartmentalization in planctomycetes: novel types of structural organization for the bacterial cell. *Arch Microbiol* 175:413–429.
8. Moreno E, Cloeckert A, Moriyón I (2002) *Brucella* evolution and taxonomy. *Vet Microbiol* 90:209–227.
9. Nealson KH, Tsapin A, Storrie-Lombardi M (2002) Searching for life in the universe: unconventional methods for an unconventional problem. *Int Microbiol* 5:223–230.
10. Paster BJ, Boches SK, Galvin JL, Ericson RE, Lau CN, Levanos VA, Sahasrabudhe A, Dewhirst FE (2001) Bacterial diversity in human subgingival plaque. *J Bacteriol* 183:3770–3783.