

## La importancia de lo pequeño

# La importancia de lo pequeño. Comunidades bacterianas y sociedad humana

Eduardo Fernández Valiente

La vida se inició en nuestro planeta hace unos 3800 millones de años. Durante sus primeros 2000-2500 millones de años la Tierra estuvo poblada en exclusiva por comunidades bacterianas, que en su lenta evolución cambiaron las condiciones del planeta, propiciando así la posterior aparición de formas de vida más complejas.

La evolución bacteriana dio origen a la maquinaria metabólica de las células y a los procesos moleculares básicos que permiten la transferencia y la expresión de la información genética. Además, la diversificación evolutiva de las bacterias condujo a la aparición de todas las formas de nutrición que hoy existen. La actividad secuencial y acompasada de las bacterias fotosintéticas, heterótrofas, saprofitas y quimiosintéticas permitió y permite que la materia se recicle y pueda utilizarse de forma indefinida. El desarrollo de todas estas formas de nutrición tuvo, por tanto, como consecuencia un hecho trascendental: se cerraron los ciclos biogeoquímicos del planeta, con lo que la vida pudo perpetuarse a expensas de la energía solar.

Otra consecuencia formidable de los cambios metabólicos bacterianos fue el cambio en la composición de la atmósfera –la «revolución del oxígeno»– que no sólo posibilitó la aparición de los complejos organismos aerobios, gracias a la posibilidad de disponer de eficientes mecanismos de obtención de energía, sino que además dio origen a la formación de la ozonósfera, la cual, al detener la mayor parte de la radiación ultravioleta, posibilitó la salida de la vida a tierra firme y su desarrollo en el ambiente terrestre. Si hoy estamos aquí, respirando oxígeno y caminando por tierra firme, se lo debemos al hecho de que hace miles de millones de años un pequeño grupo de bacterias modificó ligeramente su aparato fotosintético y empezó a utilizar el hidrógeno del agua como donador de electrones fotosintéticos, con el consiguiente desprendimiento de oxígeno a la atmósfera.

Pero no sólo el aire que respiramos se lo debemos a las bacterias, sino que también el orgánulo celular que nos permite utilizar el

oxígeno del aire para obtener energía del alimento que ingerimos —la mitocondria—, es fruto de la evolución bacteriana y del proceso de simbiosis que condujo a la formación de las células eucariotas, de las que estamos formados las plantas y los animales.

A pesar de su importancia evolutiva y ecológica, el mundo bacteriano ha sido y es un gran desconocido para la sociedad. Son demasiado pequeñas para prestarles atención. Comparadas con la majestuosidad de un león en la sabana africana o de una secuoya en los bosques de California, las bacterias son absolutamente insignificantes y carentes de interés. Sólo se ve en ellas un conjunto de agentes infecciosos a los que hay que combatir y destruir. Sin embargo, el mundo bacteriano tiene mucho que enseñarnos. Por algo son los más viejos habitantes de la Tierra y han sido capaces de sobrevivir a todas las grandes catástrofes planetarias, que supusieron la extinción masiva de muchas especies de mayor tamaño y, en apariencia, de mayor capacidad e importancia.

## La sociedad humana y el darwinismo

**E**l hombre de hoy, sin embargo, no cree que tenga mucho que aprender de la Naturaleza, vive su vida completamente ajeno a la misma, y se considera a sí mismo un ser especial separado del resto de los seres vivos. Su relación con la Naturaleza es de absoluta dominancia, se cree con derecho a explotarla a su antojo. Su interés por el estudio de la Naturaleza no es una cuestión de supervivencia, ni siquiera de un simple afán de conocerla, es un interés basado únicamente en su explotación y en su manipulación. Un interés puramente mercantilista en aras al llamado «progreso» y «bienestar social».

El resultado de esa percepción de la naturaleza está a la vista de todos: el planeta está en crisis. El cambio climático, el agujero de ozono, la lluvia ácida, la contaminación del agua y de la atmósfera son algunos de los síntomas de esa crisis. El resultado de todos esos problemas, es la progresiva y alarmante desa-

parición de especies, cuya cifra, estimada en unas 30.000 especies al año (1), es comparable a la de las grandes extinciones que tuvieron lugar en épocas anteriores del planeta, como la ya famosa extinción del Cretácico, hace 65 millones de años, que supuso la extinción de los dinosaurios. En ese caso, la extinción fue consecuencia de un hecho fortuito, la colisión de un meteorito con la Tierra. En este caso, el origen de la extinción no es un hecho fortuito, sino que es el resultado del hacer egoísta y manipulador del hombre. Es seguro que las bacterias conseguirán sobrevivir a la nueva extinción provocada por el hombre, al igual que sobrevivieron a las anteriores. La cuestión es si sobrevivirá el propio hombre.

La sociedad humana es una sociedad individualista, donde cada uno mira para sí mismo sin importarle lo que le ocurra a los demás. Es una sociedad de triunfadores y perdedores, donde palabras como solidaridad o cooperación suenan a palabras huecas y vacías de contenido. La base de la sociedad humana es la competencia y el individualismo y ello encuentra su justificación y su apoyo desde el mundo de la Ciencia y en particular desde la teoría darwinista de la Evolución, según la cual, la competencia y la supervivencia del más apto son el motor de la Evolución y, por tanto, las causas que han dado origen a la aparición de la propia especie humana.

La teoría de la Evolución de Darwin es, sin duda alguna, la teoría científica que ha ejercido una mayor influencia en la sociedad. De hecho, el éxito inicial de la teoría se debió más al calor con que fue acogida por los llamados darwinistas sociales, que por su acogida en el mundo científico de la época.

La publicación del libro de Darwin marcó un hito irreplicable en el mundo de la ciencia, la primera edición del libro se agotó el mismo día que se puso a la venta. ¿A qué se debió ese éxito editorial sin precedentes?, ¿tan apasionada estaba la burguesía inglesa de mediados del siglo XIX por la Naturaleza? Para entender ese éxito fulminante hay que situarse en el contexto histórico y social de la época, en la sociedad inglesa victoriana. Estamos en los inicios de la revolución industrial, o lo que es lo mismo, del capitalismo y del libre mercado. Una época en la que las desigualdades sociales se habían acentuado y en la que buena

parte de la sociedad vivía en unos niveles de pobreza y miseria considerables. Una época en la que economistas como Malthus y Spencer habían acuñado el término de la «supervivencia del más apto», aplicado a la economía y la sociedad, como una justificación a las desigualdades sociales.

Es en ese contexto histórico y social en el que Darwin publica su libro, cuyo éxito inicial se debe más a la aplicación a la Naturaleza de las ideas económicas de la época, que a la pasión de la burguesía inglesa por la Biología. Las ideas de Darwin suponían un apoyo formidable y una justificación científica a las ideas económicas y sociales de su tiempo, ideas que se han extendido y fortalecido en la sociedad actual. Si la Naturaleza obra según los principios de la lucha por la vida, supervivencia del más apto, competencia y selección natural, es lógico que la sociedad humana funcione según los mismos parámetros.

Además, las ideas de Darwin permiten desprenderse de la idea de un Dios Creador para explicar la Naturaleza. Se sustituye la fe en Dios por la fe en el método científico, o lo que es lo mismo por la fe en el hombre y en sus capacidades.

La sociedad actual es fruto de las ideas sociales y científicas que, como la teoría de Darwin, están basadas en el viejo paradigma reduccionista. La visión reduccionista del mundo y de la vida es una visión analítica, centrada en el estudio de los componentes estructurales de un sistema, de forma que el conocimiento de esos componentes por separado nos llevará a la comprensión del sistema en su totalidad. El reduccionismo se basa en relaciones lineales causa-efecto y presta escasa atención a las múltiples interrelaciones que se establecen entre los componentes de cualquier sistema.

Los seres vivos no se escapan a esta visión reduccionista y mecanicista, de hecho, Descartes los comparaba con los relojes. Según esta visión reduccionista, potenciada por el enorme desarrollo de la Biología Molecular, el conocimiento del genoma de un organismo nos llevará a la comprensión de ese organismo. Una consecuencia implícita de esta visión reduccionista es la total separación del hombre (observador) y la Naturaleza (observado).

## La nueva visión de la Ciencia: Teoría de Sistemas

La cuestión es saber si ese modelo científico es correcto o no. La respuesta que está surgiendo desde distintos campos de la ciencia, como la física cuántica y relativista, las matemáticas de sistemas complejos, la termodinámica de sistemas abiertos, la ecología etc, es que el modelo reduccionista de la vida y el universo no es correcto. El reduccionismo es un buen método de estudio, pero no es la forma correcta de entender la realidad.

Lo que está surgiendo de todos esos campos de la ciencia es un nuevo modelo holístico, en el que la realidad aparece como una compleja red de interrelaciones, completamente alejada de la visión lineal causa-efecto y en la que observador y observado son inseparables y se influyen mutuamente. Esta nueva visión del mundo y de la vida, holística y ecológica, se puede englobar en la llamada Teoría de Sistemas (2).

La teoría de sistemas supone un cambio radical de pensamiento desde las partes al todo, o lo que es lo mismo, un cambio de objetos a relaciones. Los seres vivos son totalidades integradas cuyas propiedades no pueden ser reducidas a las de sus componentes. El mundo viviente se percibe como una compleja red de interrelaciones, que se estructura en niveles de organización creciente, de sistemas vivos que anidan en el interior de otros, de redes dentro de redes. Así, los orgánulos celulares se organizan en células; las células en tejidos y órganos, los órganos en organismos, los organismos en sociedades etc. El paso de un nivel de organización al nivel superior implica la aparición de propiedades emergentes que no están presentes en los niveles inferiores y que son el resultado de las múltiples relaciones que establecen entre ellos. En palabras de Lynn Margulis: «un orgánulo en el interior de una ameba, en el tracto intestinal de un mamífero que vive en un bosque de este planeta, se encuentra inmerso en un mundo que está comprendido en muchos otros mundos. Cada uno de ellos proporciona su propio punto de referencia y su propia realidad» (3).

Según la visión sistémica, los seres vivos son entidades autopoiéticas, es decir, entidades

que se autoorganizan siguiendo un determinado patrón de organización (4). El patrón de organización es un concepto clave de la teoría de sistemas. Los patrones no pueden pesarse ni medirse, son redes de relaciones que configuran y caracterizan un determinado sistema. El patrón de organización básico y elemental de todos los seres vivos sería la célula, con toda su compleja red de interrelaciones moleculares. Cuando una célula se reproduce, no sólo le transmite a su descendencia la información contenida en su ADN, le transmite también su patrón de organización.

Los seres vivos nos caracterizamos también por ser lo que Prigogine llamó «estructura disipativa de energía» (5). Es decir, estructuras termodinámicamente abiertas que necesitan un aporte constante de materia y energía. Gracias al incesante flujo de materia y energía y al constante recambio de sus componentes, los organismos vivos mantienen estable su estructura general a través de la autoorganización. Por eso seguimos siendo nosotros mismos a pesar de que todas nuestras células se hayan recambiado muchas veces a lo largo de nuestra vida...

En ese hacerse a sí mismo y generar su orden interno, los seres vivos disipan en forma de calor buena parte de la energía incorporada, aumentando así el desorden (entropía) de su entorno. Esa capacidad de generar desorden en el entorno como consecuencia de la creación del orden interno es palpable cuando se considera la cantidad de basura y contaminación que generamos en nuestro hacer cotidiano. Cuanto más compleja y organizada es la estructura social creada por el hombre, mayor nivel de desorden y contaminación genera en el ambiente. Ello no es más que el reflejo de las leyes termodinámicas que gobiernan el universo y la vida.

La tercera característica de los sistemas vivientes, según la teoría de sistemas, sería la cognición, el proceso de conocer (4). La actividad organizadora de los sistemas vivos, a todos los niveles de la vida, es una actividad cognitiva. Las interacciones de un organismo vivo –bacteria, planta, animal u hombre– con su entorno son interacciones cognitivas, porque todos ellos, incluidos los más simples, tienen capacidad de percepción de estímulos internos y externos y de dar las respuestas homeostáticas adecuadas a esos estímulos. La

cognición es, según Maturana y Varela (4), una consecuencia necesaria e inevitable del grado de complejidad de los patrones de organización básicos de la Vida.

Esta nueva visión holística y sistémica de los seres vivos es difícilmente compatible con la visión reduccionista del proceso evolutivo que tiene el darwinismo. La Evolución se concibe desde la Teoría de Sistemas como un proceso unitario que abarca a toda la biosfera y que no puede reducirse a los cambios adaptativos de una u otra especie (2). La Evolución no sólo implica un cambio en la estructura y morfología de los organismos sino también un cambio en sus interrelaciones. Cualquier modificación que aparezca en un sistema va a repercutir de forma inmediata en todos los componentes de ese sistema y, en consecuencia, será el conjunto del sistema el que evolucione. La evolución de una especie no puede entenderse al margen de la evolución de las especies que se interrelacionan con ella. ¿Cómo se puede entender la evolución de las plantas con flores al margen de la evolución de los animales que las polinizan?

Un aspecto clave para la comprensión del proceso evolutivo, que no ha sido tomado en consideración en la teoría darwinista, es el hecho de que no sólo el ambiente influye en la evolución de los seres vivos, sino que también los seres vivos influyen en la evolución del ambiente, y de esa forma están influyendo y modelando su propio proceso evolutivo.

Un claro ejemplo de ello lo tenemos en la aparición y acumulación del oxígeno en la atmósfera, que es, sin duda alguna, el cambio más importante que ha sufrido el ambiente del planeta a lo largo de su historia y el de mayor trascendencia evolutiva. Ese cambio no fue casual, sino que fue propiciado por la evolución de las cianobacterias, un grupo cosmopolita de bacterias fotosintéticas que aparecieron en la tierra hace 3500 millones de años.

O por poner un ejemplo más cercano en el tiempo, pero no menos claro. La actividad de la especie humana está cambiando drásticamente las condiciones del planeta. Ello está incidiendo claramente en la biodiversidad de plantas, animales y microorganismos y por tanto en el proceso evolutivo de los mismos.

Como se comentó anteriormente, para la Teoría de Sistemas la vida se organiza en niveles de complejidad creciente. Esta estructura-

ción de la materia viva hace que cada estructura tenga un comportamiento dual: es un todo y una parte a la vez. Es un todo en su propio nivel de organización y es una parte del nivel de organización superior. Una célula es un todo en el nivel de organización celular y al mismo tiempo una parte de un organismo. Como «todo» tienen que competir con otros «todos» para mantener su espacio vital; como parte tiene que cooperar con las otras partes para mantener con vida al nivel de organización superior, ya que de la supervivencia de éste, depende su propia supervivencia. La vida no es sólo competencia como nos han querido hacer ver, la vida, como proceso unitario es sobre todo cooperación, un delicado equilibrio entre la cooperación de las partes y la competencia de los todos. La evolución depende en último término de ese delicado equilibrio entre los dos términos opuestos, pero complementarios.

## Comunidades bacterianas y sociedad humana: Cooperación y competencia

**E**l ejemplo más claro de la importancia de la cooperación en los procesos de la vida nos lo dan las comunidades bacterianas, que no olvidemos que son los más antiguos habitantes del planeta y, por tanto, con una más que contrastada capacidad de adaptación y supervivencia.

La percepción del mundo microbiano en la comunidad científica ha ido cambiando a medida que se han ido conociendo mejor los procesos vitales y el comportamiento ecológico de estos microorganismos.

La idea que se tenía del mundo bacteriano era similar a la que se tiene de los organismos complejos multicelulares, es decir, organismos individuales y aislados que eventualmente interaccionan entre sí, y que compiten unos con otros para asegurarse la supervivencia.

La realidad ha demostrado ser, sin embargo, muy distinta. La realidad es que las bacterias se asocian en complejas comunidades en las que conviven organismos de distintas especies, formando auténticos microcosmos de pocos milímetros de espesor, que han recibido

distintos nombres: consorcios, tapetes, biopelículas, etc. (6). La placa dental o la capa mucosa que aparece en el fondo de un florero al cabo de uno o dos días, son ejemplos cotidianos de estas comunidades.

La actividad vital de los distintos grupos de bacterias que se asocian en estas comunidades, da lugar a la formación de distintos microambientes en los que cada grupo va a encontrar el mejor acomodo a sus necesidades y va a estar protegido de factores ambientales potencialmente tóxicos (altos niveles de oxígeno, alta intensidad de luz, exposición a la radiación ultravioleta, desecación, estrés osmótico etc). Estas asociaciones facilitan el intercambio de nutrientes, gases y metabolitos, y reflejan un estilo de vida mutualista y sinérgico, donde el crecimiento, la reproducción y los ciclos biogeoquímicos son llevados a cabo de forma más eficaz que en poblaciones aisladas.

En estas comunidades, los desechos que genera un grupo de bacterias crean los nutrientes y las condiciones ambientales idóneas para el desarrollo de otros grupos bacterianos. Con frecuencia estas comunidades, que aparecen por doquier en los espacios naturales, se disponen en laminas estratificadas, en las que las bacterias fotosintéticas, productoras de oxígeno y materia orgánica —las cianobacterias— se sitúan en la parte superior, expuestas a la luz solar. Por debajo de ellas se sitúan las bacterias heterotróficas aerobias, consumidoras de oxígeno y materia orgánica, y las bacterias quimioautotróficas, que necesitan oxígeno para oxidar los compuestos, como el amonio, de los que obtienen la energía necesaria para sintetizar su propia materia orgánica. La actividad de estas bacterias que consumen oxígeno origina condiciones anaerobias en las capas más profundas, donde van a residir distintos grupos de bacterias anaerobias. El grado de asociación que se establece entre estas comunidades hace que muchos de estos organismos no puedan ser aislados y cultivados en los laboratorios. Su crecimiento en el laboratorio requiere la presencia de las demás bacterias de la comunidad (6).

El establecimiento de estas comunidades implica la existencia de un auténtico lenguaje molecular. Las bacterias pioneras de la comunidad emiten señales químicas que son percibidas por otras bacterias, que acuden así a unirse con las primeras para formar la comuni-

dad. El estudio y conocimiento de estas señales químicas abre una posible vía terapéutica para abordar enfermedades causadas por biopelículas bacterianas que anidan en nuestro organismo (7). Si se consigue interferir estas señales y «engañar» así a las bacterias, se podría evitar la formación de estas biopelículas patógenas.

Pero la cooperación del mundo bacteriano va más allá de la formación de comunidades integradas. Las bacterias son capaces de intercambiar información entre ellas, y no cualquier tipo de información, sino la más preciosa y vital que tienen, aquella que las identifica y diferencia de las demás: la información genética. Las bacterias intercambian sus genes, y no ya entre individuos de la misma especie, sino entre individuos de distintas especies. Este fenómeno, que es independiente de la reproducción, se conoce como transferencia lateral u horizontal de genes, para distinguirlo de la transferencia vertical de genes, que es la que se produce de padres a hijos.

Mediante estos procesos de transferencia horizontal de genes, cualquier bacteria puede adquirir genes procedentes de otras bacterias, lo que le permite desarrollar actividades para las que su propio ADN no lleva información. De esta forma, el mundo bacteriano es mucho más flexible y presenta mayor capacidad de adaptación que el mundo de los organismos eucariotas, lo que, sin duda alguna, ha contribuido a su larga supervivencia sobre la Tierra.

Esta transferencia lateral de genes es la responsable, por ejemplo, de la transmisión de la resistencia a los antibióticos, proceso bien conocido en todos los hospitales desde los años 70. Si aplicamos nuestra mentalidad humana, basada en el individualismo y la competencia, ¿qué sentido puede tener el que una bacteria le «preste» a otra sus genes de resistencia a los antibióticos? ¿Por qué ceder a un posible competidor un gen que le va a salvar la vida y le va a permitir seguir reproduciéndose? ¿No sería más lógico, desde nuestro punto de vista, dejar que el antibiótico surtiera su efecto y librara a la bacteria del posible competidor? Es evidente que desde el punto de vista de la competencia la cosa no tiene sentido, y más si se tiene en cuenta que la bacteria receptora pertenece, en muchas ocasiones a una especie distinta.

La única explicación a esta transferencia lateral de genes es la cooperación entre los

individuos que conforman la comunidad, ya que de la supervivencia de la comunidad depende la de todos sus componentes. De hecho, esta transferencia lateral de genes parece ser uno de los factores responsables de la formación de las comunidades (8).

Pero el ejemplo más notable de cooperación bacteriana, que llevamos impreso en todas nuestras células, es la simbiosis. La simbiosis es un proceso mediante el cual dos organismos diferentes se juntan y forman una asociación estable. El primer gran salto evolutivo hacia la aparición de formas de vida más complejas se produjo hace unos 1500 millones de años y tuvo lugar a través de una simbiosis entre bacterias. Una bacteria aerobia, que utilizaba el oxígeno para extraer energía de la materia orgánica, entró en el interior de otra y entre las dos establecieron una asociación cooperativa. Con el paso del tiempo este consorcio bacteriano se hizo tan interdependiente que llegó a funcionar como un solo organismo integrado, de forma que buena parte de los genes de la bacteria invasora —la actual mitocondria— se transfirieron lateralmente al genoma de la bacteria hospedadora. De esta forma, la bacteria aerobia que había entrado en el interior de la otra entregó una parte vital de sí misma —sus genes— a la custodia de la célula hospedadora a cambio de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del nuevo organismo integrado y de metabolizar el oxígeno tóxico que las rodeaba.

Este proceso simbiótico no fue un hecho aislado porque volvió a repetirse poco después, implicando en este caso a una bacteria fotosintética. De nuevo, la bacteria fotosintética invasora —el actual cloroplasto— cedió una parte de sus genes a la bacteria hospedadora a cambio de suministrar energía y materia orgánica al nuevo organismo integrado. Estos consorcios bacterianos descubrieron que la cooperación entre ellos era más ventajosa que la competencia, y así, organismos separados se convirtieron en uno solo, creando una totalidad que era mayor que la suma de las partes.

Pero la simbiosis no es un hecho aislado que se sitúe en los orígenes de la célula eucariota, sino que aparece por doquier en la naturaleza, tal es el caso de los líquenes (algas y hongos), o de los arrecifes de coral (celentéreos y algas dinoflageladas), o de la asociación entre leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*, o

el caso de las bacterias que viven en simbiosis en el interior del aparato digestivo de muchos animales. Como se ve, la cooperación no es un hecho aislado en la naturaleza.

La simbiosis es, por tanto, una asociación cooperativa entre dos organismos en los que ambos se benefician y de la que surge una estructura nueva, más compleja, y con propiedades emergentes que no tienen ninguno de los asociados por separado. La idea de la cooperación como fuerza evolutiva, choca frontalmente con la idea darwinista de la lucha por la vida y la competencia como motor de la evolución a través de la selección natural, sin embargo, los hechos están ahí y nos muestran claramente la importancia de la cooperación en el proceso evolutivo.

## Conclusión

La sociedad humana se ha venido edificando sobre la base del viejo paradigma reduccionista, de seres separados que deben competir para sobrevivir. Esa separación y esa competitividad han conducido al deterioro y progresiva destrucción de la Naturaleza que nos sustenta. El hombre no tiene consciencia de que forma parte de un ecosistema planetario del que depende su supervivencia como especie. En su arrogancia se cree que tiene, no sólo derecho, sino capacidad y conocimiento para manipular la Naturaleza a su antojo. Y ahí está su gran equivocación. Su conocimiento, basado en la percepción reduccionista, es un conocimiento fragmentario y escaso. El hombre ignora la Naturaleza, y no sólo en el sentido de no hacerla caso, sino en el sentido de desconocerla. Pero en lugar de reconocer su ignorancia, juega a aprendiz de brujo con ella, y el resultado de ese juego es su creciente deterioro.

A través de su supervivencia desde hace 3800 millones de años, superando todas las catástrofes planetarias, las bacterias nos enseñan la importancia de la cooperación en los procesos de la vida. Son pequeñas y apenas las damos importancia, pero su enseñanza está ahí para el que quiera verla. Son los más viejos habitantes del planeta, y ya se sabe que la sabiduría está en los ancianos, aunque, al igual que a las bacterias, les hacemos poco caso.

La vida no se aprende en los libros, ni en los laboratorios, ahí se adquiere conocimiento, pero la auténtica sabiduría sólo la da la vida. Y en la vida, pese a lo que nos han hecho creer, lo importante no es competir, sino cooperar. Esa es la gran enseñanza del viejo mundo bacteriano. ¿Seremos capaces de aprenderla? Nuestra supervivencia como especie puede depender de ello.

## REFERENCIAS

1. LEAKEY, R., y LEWIN, R. (1997): *La sexta extinción. El futuro de la vida y de la humanidad*. Barcelona. Tusquets Editores. Metatemas.
2. CAPRA, F. (1998): *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama. Barcelona. Argumentos.
3. MARGULIS, L., y SAGAN, D. (1995): *Microcosmos. Cuatro mil años de evolución desde nuestros ancestros microbianos*. Barcelona. Tusquets Editores. Metatemas.
4. MATURANA, H., y VARELA, F. (1980): *Autopoiesis and Cognition*. D. Reidel. Dordrecht.
5. PRIGOGINE, I., y GLANSDORFF, P. (1971): *Thermodynamic Theory of structure, stability and fluctuation*. Nueva York. Wiley.
6. PEARL, H., y PINCKNEY, J.L. (1996): «A mini-review of microbial consortia: their role in aquatic production and biogeochemical cycling». *Microb. Ecol*, 31: 225-247.
7. COSTERTON, J.W., y STEWART, P.S. (2001): «Películas bacterianas». *Investigación y Ciencia*, 300:55-61.
8. GHIGO, J.M. (2001): «Natural conjugative plasmids induce bacterial biofilm development». *Nature* 412:442-445.