



LYNN MARGULIS

LYNN MARGULIS

UNA REVOLUCIÓN
en la evolución

ESCRITOS SELECCIONADOS

EDICIÓN A CARGO DE
JULI PERETÓ

COL·LECCIÓ HONORIS CAUSA
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA
2003

Aportaciones a la biología evolutiva

1. Sagan (1967).
2. Margulis (1970).
3. Margulis (1993).

Lynn Margulis se ha hecho merecedora de un lugar destacado dentro de la historia de la ciencia en general, y de la biología evolutiva en particular, por su explicación del origen de la célula eucariótica —es decir, aquel tipo de célula con núcleo que encontramos como constituyente de los animales, plantas, hongos y todo un colectivo de organismos llamados protoctistas. Desde su época de estudiante de doctorado no ha cesado de profundizar y acumular pruebas que apoyan el origen quimérico, por asociación simbiótica de individuos, de estas células y sus constituyentes: las mitocondrias —centrales energéticas donde se oxidan los materiales orgánicos—, los cloroplastos —lugar donde la luz del sol se usa para la fabricación de materiales celulares— y el aparato de la motilidad y la distribución de cromosomas durante la división celular. Con no pocas dificultades, Margulis consiguió la publicación de sus ideas en 1967 en la revista *Journal of Theoretical Biology*.¹ Y en forma de libro —*Origin of Eukaryotic Cells*— el año 1970.² En los poco más de treinta últimos años los datos recogidos —especialmente los que provienen del escrutinio bioquímico, genético y genómico de los compartimentos celulares, mitocondrias y cloroplastos— han dado la razón a Margulis, que ha mantenido un ritmo de publicación de artículos y libros realmente notable y una presencia constante en las principales reuniones científicas. En 1993 se publicaba la segunda edición de su libro *Symbiosis in Cell Evolution*,³ sin duda uno de los clásicos de la biología contemporánea que ha sido traducido a diversos idiomas como el francés o el japonés.

En resumen, dos terceras partes de su propuesta han hecho el camino desde la consideración minoritaria, políticamente incorrecta, hasta la aceptación unánime, por evidente. La explicación más sencilla, por tanto, para el origen de la célula eucariótica es que mitocondrias y cloroplastos son descendientes de antiguas bacterias de vida libre que un día fueron incorporadas a un conjunto más complejo. La otra terce-

LAU

ra 1
tod
ma
de
euc
res,
Ma
cio
de

pli
bic
de
tes
to,
co
po
an
mi
mo
de
te
ci
Fa
W
in
ca
fil
ce
de
el
la

si
w
n
c

ra parte, la del origen simbiótico del aparato de motilidad, todavía permanece pendiente de demostración. De la misma manera que persisten incógnitas profundas en la descripción de cómo debía ser aquel organismo precursor de todos los eucariotas minutos antes de incorporar los primeros simbiositos, célula que a su vez debió de ser de naturaleza quimérica. Margulis y sus colaboradores también están haciendo aportaciones significativas en este terreno aún sumido en la sombra de las dudas y las contradicciones.⁴

4. *(Véase capítulo 7).*

La simbiosis estaba bien establecida en biología como explicación evolutiva para los líquenes, las micorrizas, los rizobios de las raíces de las plantas leguminosas y otros órganos de plantas y animales, como los ojos de los peces luminescentes o los endosimbiontes de insectos -investigación, por cierto, que ocupa el interés del profesor Andrés Moya. Incluso el concepto de que la complejidad celular ha podido emerger por asociación de individuos diferentes se propuso mucho antes de que las ciencias biológicas dispusieran de las herramientas y las técnicas adecuadas para poder explorarlo y demostrarlo. La honestidad intelectual de Margulis la ha llevado a reivindicar el papel de los científicos que, en el primer tercio del siglo XX, ya pensaban en la simbiosis como explicación del origen de los orgánulos eucarióticos. Merezhkovsky, Famintzyn o Kozo-Polyansky en Rusia, Portier en Francia o Wallin en los EEUU, cada uno a su manera, señalaban el papel innovador de la simbiosis durante la evolución. En algunos casos se ha querido reconocer la influencia de pensadores y filósofos en esta forma de enfocar el problema evolutivo, como es el libro de Pyotr Kropotkin, *Ayuda mutua: un factor de evolución* (1902), a menudo considerado como una réplica clásica a la visión ultradarwinista de la «lucha descarnada por la supervivencia de los mejor adaptados».

Sin embargo, Margulis no hace la defensa del papel de la simbiosis en el proceso de la evolución contra una visión darwinista canónica sino más bien como una fuente adicional, muy potente, de innovación. La adquisición de genomas completos cuando se agrupan los organismos y generan un

consorcio genético nuevo, permite la obtención, al mismo tiempo, de un buen número de funciones nuevas. La visión estándar del árbol de la vida de Darwin, basado únicamente en la herencia vertical, donde las ramas sólo se pueden bifurcar, se modifica así introduciendo la anastomosis, la fusión de ramas. Lo que critica Margulis muy frecuentemente es la compartimentación de las disciplinas académicas, fuente inagotable de incomunicación y desconfianza. Que una visión neo-darwinista extrema nos aleja del reconocimiento de otras formas de generar novedades evolutivas. Y que, por tanto, es necesario borrar fronteras y liberarnos de prejuicios para valorar el papel de las simbiosis en la historia de la vida.

El paleontólogo Niles Eldredge ha dicho de Margulis que ha conseguido «lo que todos los científicos sueñan pero muy pocos están destinados a conseguir: reescribir los libros de texto». Me parece un comentario muy acertado y la simple inspección de los manuales universitarios o de los libros de bachillerato nos lo corrobora. La simbiosis ha pasado de ser considerada una idea heterodoxa a la ortodoxia de los libros de texto. Y lo ha hecho con la fuerza de los experimentos, de las observaciones, de la congruencia de los datos que provienen de campos tan diversos como la citología, la bioquímica, la genética, la paleontología o la historia geológica del planeta Tierra. Con Margulis los microorganismos dejan de ser simplemente esos gérmenes enojosos causantes de enfermedades o unos meros instrumentos experimentales en manos de genetistas o bioquímicos, y se convierten en protagonistas de la escena de la historia evolutiva como fuente de vida e innovación. Al mismo tiempo, su propuesta es un ejemplo tangible de cómo la ciencia es un proceso en marcha, un conocimiento provisional siempre puesto a prueba: aún queda mucho trabajo por hacer para acabar de redondear una narración evolutiva completa y coherente del origen de la célula eucariótica. Y se ha de hacer como Margulis nos muestra: con rigor, con trabajo de observación y de experimentación contrastable, alejados del dogmatismo y de los prejuicios. Hemos de estar permanentemente preparados para ser sor-

LAU

pre
par
llo
val
ter
esc
do
cu
ha

Es

dr
tar
fer
vi
mi
pe
de
qu
cc
G
un
gv
m
er
si
al
se
p
c
d
t
g
a

prendidos por lo inesperado, permanentemente preparados para cambiar de opinión. Margulis personifica, en fin, aquello que el físico Richard Feynman reconocía como el principal valor de la ciencia: la libertad de la duda. Una libertad de criterio que a veces tiene un coste elevado. Muchas veces hemos escuchado de ella las dificultades que con frecuencia ha tenido para recibir financiación para sus proyectos y cómo los recursos que puede obtener como conferenciante prestigiosa le han permitido tirar adelante con sus entusiastas estudiantes.

Estudios sobre ciencia planetaria

Por otra parte la contribución de Margulis a lo que podríamos denominar ciencia planetaria o geofisiología, ha sido también muy destacable. La vida es, vista desde la física, un fenómeno aberrante. No sabemos cómo se ha originado la vida y su presencia en el planeta nos resulta sorprendente. El mismo Erwin Schrödinger se preguntó qué debía ser eso que permite que la materia viva haga cosas durante más tiempo del que cabría suponer. Teniendo en cuenta la composición química de los seres vivos nos damos cuenta de que, a corto plazo, todos deberíamos morir. Parafraseando a Jostein Gaarder «hacen falta miles de millones de años para crear una célula eucariótica; para morir se necesitan unos pocos segundos». Pero eso no sucede porque consumimos incesantemente materia y energía tomadas del exterior. Así pues, nos encontramos en permanente intercambio con el ambiente. Y si la vida considerada individuo a individuo nos parece una aberración química, también lo es a escala planetaria. De eso se dio cuenta el químico James Lovelock cuando trabajaba para la NASA y le llevó a proponer la idea de Gaia, un concepto al cual Lynn Margulis ha contribuido decisivamente desde la biología. La actividad de los seres vivos altera el entorno y no podremos entender el fenómeno biológico, su origen y su evolución, si no consideramos también la evolución ambiental a la que se encuentra íntimamente ligada. Como ha

5.
Véase capítulo 8.

señalado la misma Margulis, «mejor que decir que *la Tierra está viva*, una expresión que confunde a unos y ofende a otros, es preferible decir que Gaia es una hipótesis sobre el planeta Tierra, sus sedimentos superficiales y su atmósfera» porque «la superficie terrestre es anómala si la comparamos con nuestros planetas vecinos, Marte y Venus. Las condiciones superficiales de estos dos planetas pueden comprenderse adecuadamente con las leyes de la física y de la química. Sin embargo, en relación a ciertas propiedades, la Tierra es inexplicable sólo con la física y la química». ⁵ Así, la presencia de agua líquida en la Tierra durante los últimos 4.000 millones de años sin interrupción, a pesar del aumento de la luminosidad de nuestra estrella, la composición química altamente reactiva de la atmósfera o la alcalinidad de los océanos son algunos de los síntomas de la presencia y persistencia de la vida terrestre. No tiene sentido, pues, intentar narrar la historia de la vida y la historia de la Tierra de forma independiente.

Tampoco Lovelock y Margulis fueron los primeros en borrar la frontera entre materia viva e inerte, entre los organismos vivos y el ambiente no vivo. Vladimir I. Vernadsky publicó en 1926 el libro *La Biosfera* donde describe la vida como un fenómeno planetario que permite la transformación de la energía solar en formas cada vez más complejas, más diversas, más dispersas. Como han señalado Margulis y su hijo Dorion Sagan en el sugerente libro *¿Qué es la vida?* (1995): «Vernadsky hizo por el espacio lo que Darwin había hecho por el tiempo [...]. La vida es exuberancia planetaria, un fenómeno solar. Es la transmutación astronómicamente local del aire, el agua y el sol en células. [...] La vida es la única organización en expansión conectada a través del tiempo darwiniano con la primera bacteria y, a través del espacio vernadskiano, con todos los ciudadanos de la biosfera».

1. INDIVIDUALIDAD POR INCORPORACIÓN ¹

Lynn Margulis ²

Low at my problem bending,
Another problem comes –
Larger than mine – Serener –
Involving statelier sums

Emily Dickinson ³

Simbiosis, término acuñado por el botánico alemán Anton de Bary en 1873, es la vida en común de tipos muy diferentes de organismos; de Bary de hecho lo definió como «la vida en común de organismos; con nombres diferentes». En determinados casos la cohabitación, la vida íntima a largo plazo, da como resultado la simbiogénesis: la aparición de nuevos cuerpos, nuevos órganos, nuevas especies. En resumen, creo que la mayor parte de la novedad evolutiva surgió y todavía surge directamente de la simbiosis, incluso aunque esta no sea la idea popular de las bases del cambio evolutivo que aparece en la mayoría de los libros de texto.

Mi teoría del origen simbiogenético de la célula vegetal, la célula animal y otras células con núcleo emplea cuatro postulados demostrables. Los cuatro implican simbiogénesis, incorporación y fusión corporal por simbiosis (Margulis 1993). La teoría explica con precisión los pasos que deben haber tenido lugar en el pasado, especialmente en relación con las células de color verde brillante de las plantas. Las células, por supuesto, son las unidades habituales de la estructura de los musgos, los helechos y todas las demás plantas. Los esbeltos pelos de los estambres, particularmente visibles en las flo-

1. Originalmente publicado en 1998 como capítulo 3 de *Symbiotic Planet. A New View of Evolution*, Basic Books, NY. En este capítulo se ha utilizado la versión de Victoria Laporta, publicada en *Planeta simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución*, © Editorial Debate, Madrid, 2002, pp. 45-63.

2. Distinguished University Professor, Department of Geosciences, 611 North Pleasant Street, Morrill Science Center, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003-9297.

3. Tomado de *The Complete Book of Poems of Emily Dickinson*, T. H. Johnson, ed. Little Brown and Co., 1955, núm. 69.

res de *Zebrina* y *Tradescantia* («judío errante»), están hechos de filas de células vegetales como esas. Las células verdes, grandes y con pared precedieron a las plantas; ya estaban completamente formadas en las algas verdes, sus ancestros acuáticos. Que los organismos nucleados evolucionaron por fusión se aprecia mejor en las plantas porque en sus grandes y bellas células se puede observar fácilmente la integridad de los orgánulos que las componen. La idea es clara y sencilla: cuatro ancestros, una vez completamente independientes y físicamente separados, se fusionaron siguiendo un orden específico para convertirse en la célula verde de alga. Los cuatro eran bacterias y cada una de ellas era diferente a las demás en algún aspecto que todavía podemos inferir. Ya sea en forma fusionada o en forma de organismo de vida libre, los descendientes de los cuatro tipos de bacterias todavía viven hoy. Algunos dicen que los cuatro tipos viven mutuamente esclavizados, atrapados por la planta y dándole forma. Hoy cada uno de los tipos de antiguas bacterias nos proporciona pistas sobre su ascendencia; la vida es químicamente tan conservadora que incluso podemos deducir el orden específico en el que se fusionaron. El término *seriada* de la *teoría de la endosimbiosis seriada* se refiere al orden en esta secuencia de fusión.

Creo que ya he convencido a muchos científicos y estudiosos de que las partes de la célula –los orgánulos– se originan simbiogenéticamente como consecuencia de diferentes simbiosis permanentes. Por supuesto, muy pocas pruebas de esta teoría son producto de mi trabajo; cientos de científicos contribuyeron a ella. Ahora estoy trabajando para extender esta idea y mostrar que otros organismos más grandes que las células, y sus nuevos órganos y nuevos sistemas de órganos, también evolucionaron por simbiogénesis.

Si los simbiosis se fusionan completamente, si se funden y forman un nuevo tipo de ser, por definición el nuevo «individuo» –el resultado de la fusión– evolucionó por simbiogénesis. Aunque el concepto de simbiogénesis fue propuesto hace un siglo, sólo ahora contamos con las herramientas necesarias para contrastar la teoría rigurosamente.

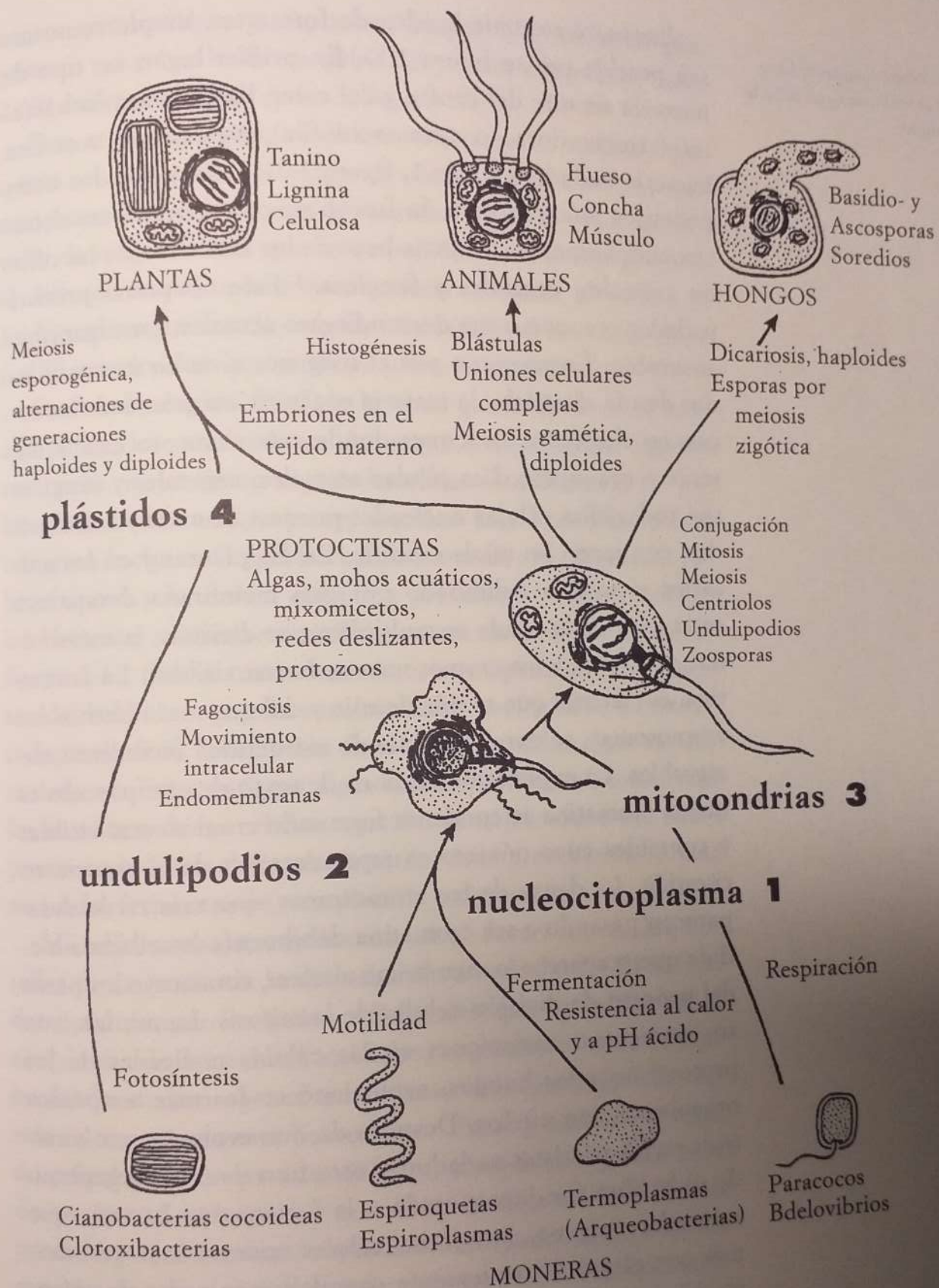


FIGURA 1.1. Simbiogénesis y origen de los eucariotas: Adquisición de las mitocondrias después de los undulipodios. Los números se refieren al orden de adquisición. Dibujo de Kathryn Delisle.

4.

Las células fúngicas incluyen las de los hongos y las de las levaduras.

Intentaré resumir la idea de forma tan simple como me sea posible (véase figura 1.1). En primer lugar, un tipo de bacteria amante del azufre y del calor, llamada arqueobacteria fermentadora (o termoacidófila), se fusionó con una bacteria nadadora (paso 1, figura 1.1). Juntos, los dos componentes integrados de la fusión se convirtieron en el nucleocitoplasma, la sustancia base de los ancestros de las células animales, vegetales y fúngicas.⁴ Este temprano protista nadador era, como sus descendientes actuales, un organismo anaerobio. Envenenado por el oxígeno, vivía en arenas y lodos donde abundaba la materia orgánica, en grietas de las rocas, en charcos y estanques donde este elemento estaba ausente o era escaso. Las células animales, vegetales y fúngicas son todas ellas células nucleadas porque, acuosas y translúcidas, contienen un núcleo visible. En las plantas y en los animales el núcleo delimitado por una membrana desaparece cada vez que la célula se multiplica por división; la membrana se disuelve y los cromosomas se hacen visibles. La cromatina, el material que se tiñe de rojo y del que están hechos los cromosomas, se enrolla formando estructuras fácilmente observables. La explicación de libro de texto de este proceso es que la cromatina se condensa formando cromosomas visibles y contables cuyo número es representativo de la especie en cuestión. La danza de los cromosomas, que más tarde desaparecen pasando a ser cromatina débilmente enrollada a medida que reaparece la membrana nuclear, constituye los pasos del proceso de división celular de la mitosis. La mitosis, con sus numerosas variaciones en las células nucleadas de los protoctistas y los hongos, evolucionó en los más tempranos organismos con núcleo. Después de que evolucionara la mitosis en los protistas nadadores, otro tipo de microorganismo de vida libre fue incorporado a la fusión: una bacteria que respiraba oxígeno. Surgieron células todavía más grandes, más complejas. El triplemente complejo respirador de oxígeno (amante del calor y del ácido, nadador y respirador de oxígeno) se volvió capaz de engullir alimento en forma de partículas. Estas células con núcleo, seres complejos y asom-

brosos que nadaban y respiraban oxígeno, aparecieron por primera vez sobre la Tierra quizá tan pronto como hace unos 2.000 millones de años (paso 3, figura 1.1).

Esta segunda fusión, en la que el anaerobio nadador adquirió un respirador de oxígeno, condujo a células con tres componentes cada vez más preparadas para soportar los niveles de oxígeno libre que se acumulaban en el aire. Juntos, el delicado nadador, la arqueobacteria tolerante al calor y al ácido y el respirador de oxígeno, formaban ahora un único y prolífico individuo que produjo nubes de prole.

En la adquisición final de la serie generadora de células complejas, los respiradores de oxígeno engulleron, ingirieron, pero no pudieron digerir bacterias fotosintéticas de color verde brillante. La «incorporación» literal tuvo lugar tras una gran lucha en la que las bacterias verdes no digeridas sobrevivieron y la fusión completa prevaleció. Con el tiempo las bacterias verdes se convirtieron en cloroplastos (paso 4, figura 1.1). Como cuarto miembro, estos productivos amantes del sol se integraron con los demás socios anteriormente independientes. Esta fusión final dio lugar a las algas verdes nadadoras. Estas antiguas algas verdes nadadoras no sólo son los ancestros de las células vegetales actuales; todos sus componentes individuales todavía están vivos y en buena forma, nadando, fermentando y respirando oxígeno.

Mi mejor trabajo, según creo, es el desarrollo de los detalles de la teoría de la endosimbiosis seriada. La idea fundamental es que los genes adicionales que aparecen en el citoplasma de las células animales, vegetales y otras células nucleadas no son «genes desnudos», sino que más bien tienen su origen en genes bacterianos. Estos genes son el legado palpable de un pasado violento, competitivo y formador de treguas. Las bacterias que hace mucho tiempo fueron parcialmente devoradas, y quedaron atrapadas dentro de los cuerpos de otras, se convirtieron en orgánulos. Las bacterias verdes que fotosintetizan y producen oxígeno, las llamadas *cianobacterias*, todavía existen en los estanques y arroyos, en los lodos y sobre las playas. Sus parientes cohabitan con in-

5.
Véase capítulo 2.

numerales organismos de mayor tamaño: todas las plantas y todas las algas.

La razón de que los tempranos genetistas botánicos descubrieran genes en los cloroplastos de las células vegetales es que siempre están allí. Los pequeños descendientes verdes de las cianobacterias están en todas las células vegetales y lo han estado en todo momento.

Las cianobacterias son una forma de vida extraordinariamente floreciente. Revisten las cortinas de nuestra bañera y forman capas de verdín en nuestras piscinas, lavabos y estanques. Si reciben calor y luz solar en unos cuantos días pueden colorear de verde brillante un charco. Aunque la mayoría de las cianobacterias viven todavía por su cuenta, algunas cohabitan con socios muy diferentes en forma de simbioses. Las hay que son cloroplastos, las partes verdes de las células algales y vegetales. Otras viven en cavidades de la hoja, en capas de la raíz o en las glándulas del tallo de las plantas verdes.

De la misma forma que las cianobacterias y los cloroplastos son parientes cercanos, las mitocondrias están emparentadas con las bacterias de vida libre respiradoras de oxígeno. Yo afirmo, como antes lo hicieron otros académicos frecuentemente ignorados, que los ancestros lineales de las mitocondrias vegetales y animales también empezaron como bacterias de vida libre. Las mitocondrias, las fábricas intracelulares de energía, producen energía química dentro de las células de todos los animales, plantas y hongos. Las mitocondrias también residen de manera regular en la mayoría de las miríadas de oscuros seres microbianos, los protoctistas, a partir de los cuales evolucionaron las plantas, los animales y los hongos.⁵ Basándose puramente en las cifras, son los cloroplastos y las mitocondrias, y no los humanos, las formas de vida que dominan la Tierra. Vayan donde vayan los humanos, las mitocondrias van también, puesto que están dentro de nosotros proporcionándonos energía para todo nuestro metabolismo: el de nuestros músculos, nuestra digestión y nuestro cerebro pensante.

La simbiogénesis, una idea propuesta por su inventor ruso Konstantin Merezhkovsky (1855-1921), se refiere a la forma-

ción de nuevos órganos y organismos mediante fusiones simbióticas.⁶ Como mostraré, es un hecho fundamental de la evolución. Todos los organismos lo suficientemente grandes como para que podamos verlos están compuestos de microorganismos, una vez independientes, que forman equipo para convertirse en entidades mayores. A medida que se fusionaban, muchos de ellos perdieron lo que en retrospectiva reconocemos como su anterior individualidad.

Me gusta presumir de que nosotros, mis estudiantes, mis colegas y yo, hemos ganado tres de las cuatro batallas de la teoría de la endosimbiosis seriada (SET). Ahora podemos identificar tres de los cuatro socios que subyacen al origen de la individualidad celular. Los científicos interesados en este asunto están ahora de acuerdo en que la sustancia base de las células, el nucleocitoplasma, descendió de las arqueobacterias; en concreto, la mayor parte del metabolismo constructor de proteínas procede de las bacterias termoacidófilas («parecidas a las del género *Thermoplasma*») (paso 1, figura 1.1). Las mitocondrias respiradoras de oxígeno de nuestras células y otras células nucleadas evolucionaron a partir de simbioses bacterianas ahora llamados «bacterias púrpura» o «proteobacterias» (paso 3, figura 1.1). Los cloroplastos y otros plástidos de algas y plantas fueron en su tiempo cianobacterias fotosintéticas de vida libre (paso 4, figura 1.1). Nótese que el paso 2 no ha sido descrito.

Un tema principal y polémico perdura: ¿Cómo se originaron los apéndices natatorios, los cilios? Aquí es donde la mayoría de los científicos disienten de mí. Están de acuerdo con la descripción que hace Max Taylor de mi versión de la teoría simbiótica como la «SET extrema». Taylor y su colega Tom Cavalier-Smith, de la Universidad de British Columbia en Vancouver, están a favor de una teoría «de ramificación» no simbiótica del origen de las primeras células nucleadas. La suya es todavía la hipótesis prevaleciente. Pero existen pruebas de que un enigmático segundo socio bacteriano se unió a la antigua alianza. La primera fusión, la fusión permanente del primer y el segundo socio, fue crucial. Sucedió. Incluso

6. Véase capítulo 6.

aunque el legado de esta primera fusión sea oscuro y difícil de detectar hoy en día, deja pistas y nosotros las buscamos. Mi hipótesis de que el nadador –otro microorganismo diferente– fue adquirido simbióticamente en el primer y más antiguo paso del origen de las células nucleadas es el componente de la idea más difícil de defender. Esta primera fusión tuvo lugar hace quizá 2.000 millones de años. La idea clave de la SET (el paso 2 de la figura 1.1) es que los cilios, las colas de los espermatozoides, las protuberancias sensoriales y muchos otros apéndices de las células nucleadas surgieron en la fusión original de la arqueobacteria con la bacteria nadadora. Yo predigo que dentro de una década ganaremos esta discusión: ¡con el tiempo serán cuatro de cuatro! En este capítulo explicaré por qué mantengo mi impopular opinión y daré una idea de por qué paso mi vida recolectando pruebas que parten de todos los polvorientos rincones de la biología. Algunos colegas me tachan de combativa; otros de injusta. Algunos dicen que sólo reúno los trabajos que me interesan y que ignoro injustamente los datos contradictorios. Estas acusaciones podrían ser ciertas.

Las bacterias, fusionadas en simbiosis, nos dejan pistas de su anterior independencia. Tanto las mitocondrias como los plástidos son bacterianos en su tamaño y forma. Todavía más importante es que estos orgánulos se reproducen de manera que hay muchos presentes a la vez en el citoplasma pero nunca dentro del núcleo. Ambos tipos de orgánulos, los plástidos y las mitocondrias, no sólo proliferan dentro de las células sino que se reproducen de forma distinta y en momentos distintos a los del resto de la célula en la que residen. Ambos tipos, probablemente 1.000 millones de años después de su fusión inicial, retienen sus propias reservas reducidas de DNA. Los genes del ácido ribonucleico (rRNA) de los ribosomas de las mitocondrias todavía recuerdan sorprendentemente a los de las bacterias respiradoras de oxígeno que viven actualmente por su cuenta. Los genes ribosómicos de los plástidos son muy parecidos a los de las cianobacterias. A principios de los setenta, cuando se compararon por primera vez las se-

6. LAS PALABRAS COMO GRITOS
DE BATALLA ¹
Lynn Margulis

...y hay aún otra consideración, hay quien sostiene que cada uno de los elementos cuya fusión sirve para construir el óvulo fecundado está constituido a su vez por una masa fundida de gérmenes.

S. Butler (1898)

Nuestras palabras aprisionan nuestras mentes. El término de biología *simbiosis* se ha usado de una manera que, además de oscurecer su sentido literal, también ha oscurecido el papel instrumental de dicho fenómeno en la evolución. Los libros de biología definen la simbiosis de manera antropocéntrica, como una relación de ayuda mutua o que produce algún beneficio a los animales que participan en ella, lo cual implica la existencia de un contrato social o de un análisis costos-beneficio por parte de los miembros de la simbiosis. Esta definición es absurda, ya que la simbiosis es un fenómeno biológico que precedió en eones a la humanidad y a la invención de la moneda.

El primero que definió la simbiosis fue el micólogo alemán H. A. de Bary (1879) y lo hizo como «un tipo de convivencia entre organismos diferentes». La expresión «organismos diferentes» pronto significó miembros de especies diferentes.

Los líquenes, unos complejos de hongos asociados a fotosintetizadores (pueden ser cianobacterias o algas verdes), se han estado usando como ejemplos de simbiosis. El hongo formador de líquenes *Cladonia*, si se cultiva en una placa de Petri crece como una masa blanda; el alga formadora de

1. Originalmente publicado en 1990 como «Words as battle cries – Symbiogenesis and the new field of Endocytobiology» en *BioScience* 40:673-677. Recogido en el capítulo «Words as Battle Cries – Symbiogenesis and the New Field of Endocytobiology», en *Slanted Truths. Essays on Gaia, Symbiosis, and Evolution*, © Springer-Verlag, NY, 1997, pp. 295-305.

líquenes *Trebouxia* forma una especie de limo sobre la superficie del agar. Pero el alga y el hongo juntos, constituyendo el líquen *Cladonia cristatella*, forman una cubierta vegetal; superficialmente, el líquen es una planta terrestre (Figura 6.1).

Desde el siglo XIX los científicos han reconocido que la simbiosis puede generar grandes discontinuidades y diversidad biológica. Yo añado que, como generadora de novedad biológica, la simbiosis es aún más innovadora que la acumulación de mutaciones al azar, aunque esta última sea más aceptada como fenómeno en la base del cambio evolutivo. Los estudiantes y profesores la mayoría de las veces suelen encontrar la palabra «simbiosis» en su típica definición de libro de texto. Los autores de libros científicos describen típicamente el fenómeno como sigue:

- Una asociación interna entre dos organismos, cuyas ventajas son mayores que los inconvenientes (Collocott 1972).
- Una asociación que siempre tiene que beneficiar, como mínimo, a una de las especies, ya que de no ser así pronto se disolvería (Minkoff 1983).

Incluso en los libros de biología de literatura secundaria, la simbiosis se considera en su significado de «asociación biotrófica mutualista» (Schiff y Lyman 1982) o como una «relación mutuamente beneficiosa» (Avers 1989). Sin embargo, los investigadores actuales que estudian la simbiosis adoptan una adaptación moderna de la definición original de De Bary: la simbiosis se refiere a asociaciones físicas prolongadas entre organismos de diferentes especies, sin tener en cuenta el resultado. Estos científicos rechazan los análisis secundarios y los de los libros de texto, que miden la simbiosis por lo que podría considerarse la satisfacción del cliente.

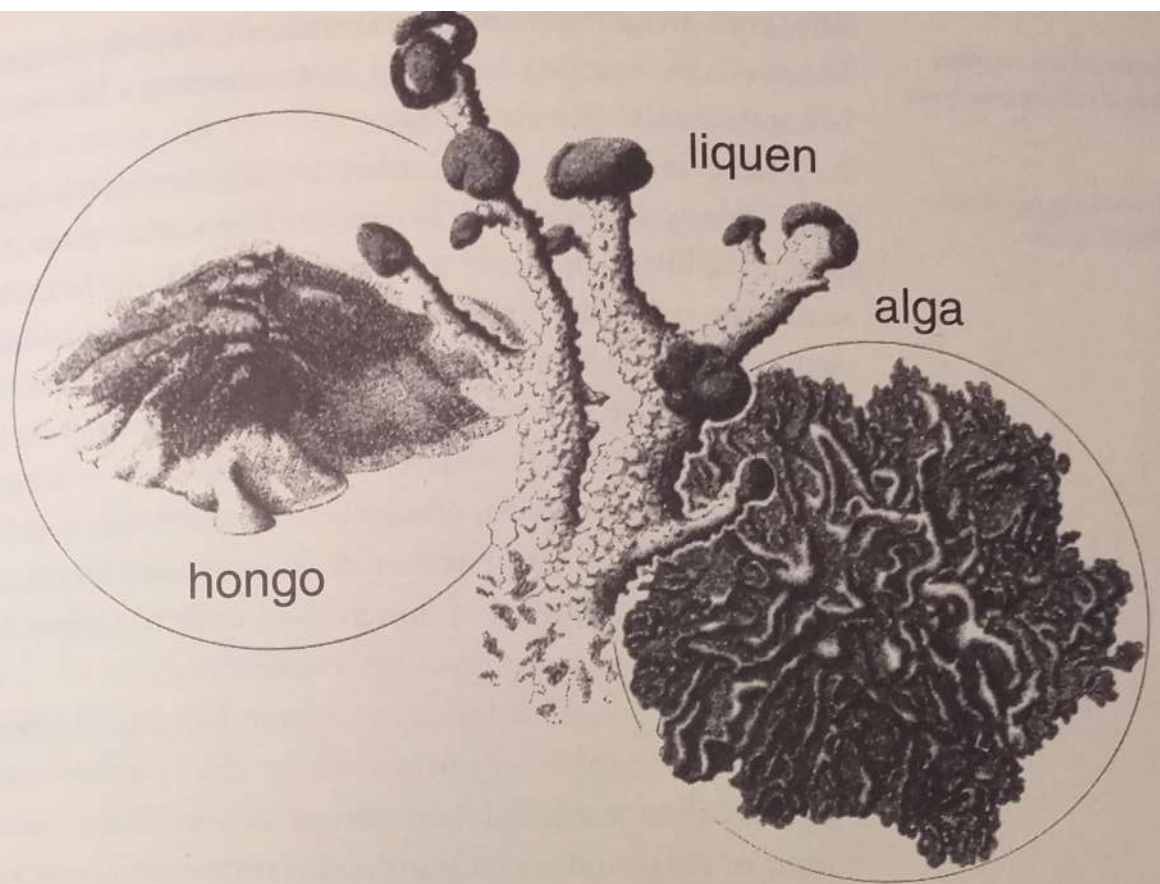


FIGURA 6.1 Los dos biontes (el alga verde *Trebouxia* y el hongo *Cladonia*) se unen para formar el holobionte del liquen *Cladonia cristatella*. Dibujo de Christie Lyons.

Simbiosis no es mutualismo

Si se define la simbiosis como una relación entre organismos de especies diferentes, es difícil distinguirla del mutualismo. Los textos de biología recientes emplean el término mutualismo para referirse a las relaciones sociales entre organismos, de la misma o diferente especie, que no tienen que estar necesariamente asociados físicamente. Dado que, según las definiciones de los libros de texto, los miembros de una simbiosis han de pertenecer a especies diferentes y tiene que haber contacto físico entre ambos, las relaciones simbióticas serían un subconjunto de las relaciones mutualísticas. Ambos fenómenos, mutualismo y simbiosis, se consideran relaciones positivas o favorables, contrariamente a lo que ocurre con las

2.
Derivado del latín, significa
«comiendo en la misma mesa».

3.
Derivado del griego, significa
«acción de llevar».

relaciones negativas como el parasitismo. Pero se trata de relaciones contingentes, sensibles especialmente a las condiciones ambientales (Lewis 1973a).

Y las complicaciones abundan. En la práctica, los aspectos temporales y espaciales de la simbiosis no suelen estar descritos en los libros de texto. Los investigadores de la simbiosis examinan si las relaciones que se establecen son casuales o facultativas, y cíclicas, permanentes o prolongadas (Starr 1975). La mayoría de autores, en cambio, se centran en lo imposible: probar que la relación «beneficia» a sus miembros. Dado que, por separado, como en el caso del alga y el hongo mencionados, los componentes de la simbiosis no crecen de la misma manera que en el líquen, no puede probarse de manera estricta que se produzca un «beneficio».

Las pruebas realizadas para aclarar los significados han aumentado el problema porque no ha sido posible medir el beneficio (una cantidad que carece de unidades) ni en el campo ni el laboratorio. Cuando el término simbiosis se hizo casi sinónimo de mutualismo biotrófico, se inventaron otros términos para indicar las relaciones neutras entre organismos asociados físicamente (Lewis 1973b). El comensalismo² describe dos especies de organismos asociadas físicamente, pero que obtienen su alimento de un tercer organismo (por ejemplo, el pez payaso y las anémonas que se alimentan de simbiontes bacterianos). Foresis³ se usa para describir la relación entre dos organismos cuando uno transporta al otro (por ejemplo, las rémoras que son transportadas por los tiburones).

Nota histórica

Una escuela rusa de biología de principios del siglo XX, prácticamente desconocida entre los científicos anglosajones, destacó el papel de la simbiosis en la evolución. Andrei Sergeivich Famintsyn (1835-1918) realizó experimentos aislando y cultivando cloroplastos obtenidos de células vegetales.

7. EL ORIGEN DEL NUCLEOCITOPLASMA.
BREVE HISTORIA DE UNA HIPÓTESIS
CAMBIANTE ¹

Antonio Lazcano Araujo ²

Introducción

En mayo de 1831 John M. Herbert, un estudiante de la Universidad de Cambridge, le hizo llegar a su admirado condiscípulo el joven Charles Darwin un regalo anónimo consistente en un microscopio marca Coddington, parecido a los impertinentes que se usaban en la ópera. Darwin no tardó en descubrir quién le había hecho el regalo, y aunque pronto abandonó hastiado la universidad, su gratitud duró toda una vida. Cuarenta años más tarde Darwin le envió a Herbert, para entonces un respetable juez británico de cabellos canos y excelente reputación, una carta en donde le decía «¿Recuerdas cuando me regalaste en forma anónima un microscopio? Pocos obsequios me han producido mayor alegría y satisfacción». Como lo demuestran sus dibujos y escritos, la gratitud de Darwin era sincera: el regalo de Herbert le había permitido examinar con fruición la anatomía de los escarabajos, una de sus grandes pasiones –pero, hasta donde sabemos, no lo usó para atisbar el mundo de los microorganismos.

Aunque es evidente que Darwin, como buen hipocondríaco, sabía de la existencia de patógenos minúsculos y del riesgo de las infecciones, no parece haberles prestado mayor atención. Como lo demuestra la lectura de su extensa obra, bacterias, protistas y otros organismos unicelulares son los

1.
Texto de la conferencia pronunciada en el homenaje a Lynn Margulis celebrado en la Universitat de València el 7 de junio de 2000.

2.
Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. postal 70-407, Cd. Universitaria, México DF.
Dirección electrónica:
<alar@correo.unam.mx>

grandes ausentes en los textos de Darwin. De hecho, ni siquiera recurrió a ellos para tratar de explicar la ausencia aparente de un registro fósil en rocas Precámbricas y explicar así un largo período de evolución previo al surgimiento de los animales que parecen brotar en forma repentina hace 560 millones de años al comenzar el Cámbrico.

La situación cambió unos años más tarde cuando Ernst Haeckel, uno de los seguidores más ardientes de Darwin, no sólo modificó los esquemas taxonómicos tradicionales al proponer un reino específico en donde agrupar a protistas y bacterias, sino que reconoció explícitamente a los microorganismos como ancestros de plantas y animales. A pesar de ello, y debido sin duda a las dificultades técnicas que planteaba su tamaño, durante buena parte del siglo XIX hubo pocos esfuerzos para estudiar la evolución de los microorganismos mismos, cuya fama quedó establecida a partir de entonces más como agentes infecciosos que como el grupo biológico de mayor diversidad y antigüedad. De hecho, las excepciones más fructíferas tuvieron que ver desde un principio con el problema del origen y la naturaleza de los eucariontes, como lo muestran los trabajos de Andreas Schimper, cuyos estudios sobre la fisiología, reproducción y estructura de cloroplastos le llevaron casi de inmediato a suponer un origen simbiótico para dichos orgánulos (Schimper 1883, 1885). Como ha insistido Sapp (1995), durante esos años tanto el reconocimiento del núcleo como una entidad intracelular bien definida, como la demostración de la reproducción binaria de los cloroplastos y la replicación de centriolos llevaron a algunos botánicos y zoólogos a suponer que las células nucleadas (que aún no estaban definidas como una categoría biológica específica) representaban una especie de cooperativa de diversos linajes microscópicos.

Estas ideas, aunque marginales, habrían de tener ramificaciones lejanas. A principios del siglo XX, y aun antes de que existiera un esquema mínimamente coherente sobre la evolución de los procariontes, los rusos Konstantin S. Merezkovsky, Andrei S. Famintsyn y Boris M. Kozo-Polyanski (fi-

gura 6.2) propusieron en forma independiente escenarios evolutivos que pretendían explicar el origen de las células animales y vegetales afirmando que mitocondrias, cloroplastos y algunas otras estructuras de los eucariontes eran resultado de procesos de simbiosis (Khakhina 1979). Aunque durante muchos años permanecieron desconocidos por el mundo académico occidental, llevada por su extraordinaria honestidad intelectual Lynn Margulis ha promovido y divulgado tanto las aportaciones de Merezhkovsky, Famintsyn y Kozo-Polyanski, como los trabajos del estadounidense Ivan E. Wallin, a los que reconoce y reinvidica como sus predecesores científicos (véase, por ejemplo, Margulis 1991a o el capítulo 6).

Es verdad que Margulis conocía, de manera indirecta, algunas de las hipótesis de Merezhkovsky y Wallin (Sagan 1967) y que hubo otras propuestas sobre el origen de los eucariontes más o menos simultáneas a su teoría (Goksøyr 1967). Sin embargo, es igualmente cierto que las propuestas de Merezhkovsky, Famintsyn y Kozo-Polyanski ocupaban un lugar marginal en la biología rusa (Sapp 1995), y que se trataba, en buena medida, de especulaciones basadas en muy pocas observaciones empíricas. Merezhkovsky, por ejemplo, nunca habló en forma explícita del origen de las mitocondrias, cuyas funciones ignoraba, y en un folleto publicado en 1909, afirmó que los seres vivos estaban formados por dos plasmas celulares de origen independiente, i.e., el *micoplasma*, que había dado origen a hongos, bacterias y orgánulos celulares, y el *amiboplasma*, perfectamente visible en las amebas, de donde habrían surgido plantas y animales (Khakhina 1979). A pesar de las ambigüedades de un esquema esencialmente especulativo, para Merezhkovsky el amiboplasma constituía el precursor evolutivo de lo que hoy llamamos nucleocitoplasma (figura 7.1).

Aunque la idea de que mitocondrias y cloroplastos eran descendientes de bacterias de vida libre había circulado en algunos medios científicos desde finales del siglo XIX, fue Lynn Margulis (Sagan 1967, Khakhina 1979, Sapp 1995)

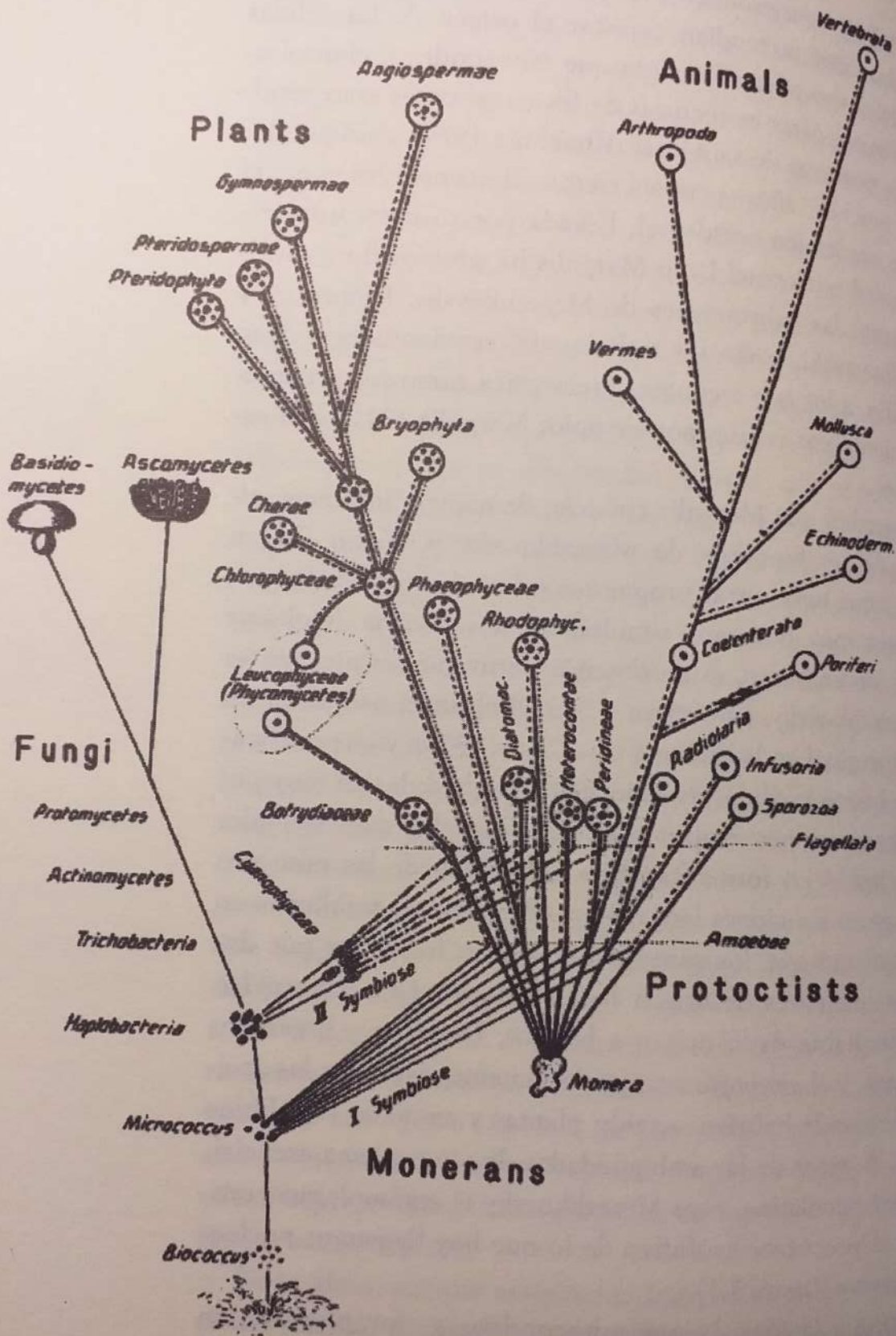


FIGURA 7.1. El papel de la endosimbiosis en la evolución biológica según Merezkhovskiy (1909). El esquema supone un origen polifilético de los organismos, y la nomenclatura utilizada no corresponde a las categorías taxonómicas actuales.

quien no sólo revivió en forma independiente la teoría endosimbiótica, sino que la articuló y apoyó con una serie de datos morfológicos, bioquímicos, genéticos e incluso geológicos tan contundentes, que sus puntos de vista terminaron por ser aceptados hasta por sus críticos más severos. Hoy sabemos que es imposible comprender la biología de los eucariontes sin reconocer el origen bacteriano de mitocondrias y cloroplastos, y que las asociaciones simbióticas, lejos de ser una curiosidad, constituyen un factor esencial en la evolución de la biosfera, pero ¿cuál es el origen del nucleocitoplasma?

La mezcla de desdén, rechazo y crítica con la que se recibieron las ideas iniciales de Margulis (véase capítulo 2 en Margulis 1998) se concentró más en el problema del origen procarionte de los orgánulos eucariontes que en la naturaleza biológica del hospedero que eventualmente se transformaría en el nucleocitoplasma. Sin embargo, en los últimos años esta situación se ha modificado, y se ha prestado mayor atención al problema del origen de esta estructura. Las hipótesis al respecto se han multiplicado en forma sorprendente, e incluso han dado lugar a la propuesta si no absurda al menos innecesaria, que supone que el ancestro de los eucariontes arribó a nuestro planeta procedente de Marte (Nisbet y Sleep 2001) —una idea que habla más de la política editorial de *Nature* que de la evolución celular misma. Como se resume líneas abajo, sin necesidad de recurrir a la panspermia es posible dar alternativas igualmente fascinantes de un problema que, en el fondo, permanece abierto.

Los grandes linajes celulares

Una de las premisas esenciales de la teoría endosimbiótica es la de la diversificación metabólica procarionte previa a la aparición de las células nucleadas. Así, para explicar la asociación funcional y metabólica entre el citoplasma eucarionte fermentativo y las mitocondrias, en cuyo interior están compartimentadas las reacciones del ciclo de Krebs, Margulis su-

girió que el primer paso hacia la aparición de las células nucleadas se dio con la ingestión de una bacteria aerobia por un heterótrofo anaerobio. Esta asociación, que devino una simbiosis obligada, dio origen a un eucarionte amiboideo de carácter aerobio pero carente de mitosis (Sagan 1967). Una segunda simbiosis con espiroquetas daría origen, primero, a consorcios microbianos dotados de movilidad, y luego a cinesomas, centriolos y aparato mitótico (Sagan 1967). Unos años más tarde, al publicar en 1970 su célebre *Origin of Eukaryotic Cells*, Lynn Margulis fue más específica al discutir la naturaleza del hospedero procarionte y propuso que se trataba de un microbio pleiomórfico cuyas habilidades metabólicas se reducían a la producción de piruvato a partir de la fermentación de la glucosa (Margulis 1970). Puesto que los procariontes no presentan ni fagocitosis ni pinocitosis, la ausencia de pared celular en los micoplasmas hacía de estas bacterias parásitas [que hoy sabemos, gracias a las comparaciones del 16S rRNA, que son parte del linaje de las bacterias Gram positivas (Woese 1987)] buenos candidatos para engullir a las bacterias aerobias ancestrales a las mitocondrias (figura 7.2).

La idea de la endosimbiosis fue ganando más y más adeptos, y muy pronto se convirtió, junto con la división taxonómica en procariontes y eucariontes, en una de las bases de la clasificación de los seres vivos en cinco grandes reinos. A finales de la década de 1960 R. H. Whittaker, un ecólogo de la Universidad de Cornell, había publicado una versión refinada de su propuesta para dividir a los seres vivos en cinco reinos, que rápidamente ganó muchos adeptos (Whittaker 1969). No hace mucho que Lynn Margulis me confió la insistencia con la que Whittaker le pidió refinar y desarrollar el modelo de los cinco reinos, confesándole que él no sólo se sentía viejo sino que además sabía poco de los eucariontes unicelulares. Así lo hizo, pero a pesar de que para entonces era cada vez más evidente la existencia de algunas diferencias en los procesos de replicación y expresión genética entre los procariontes y los eucariontes, hacia mediados de la década

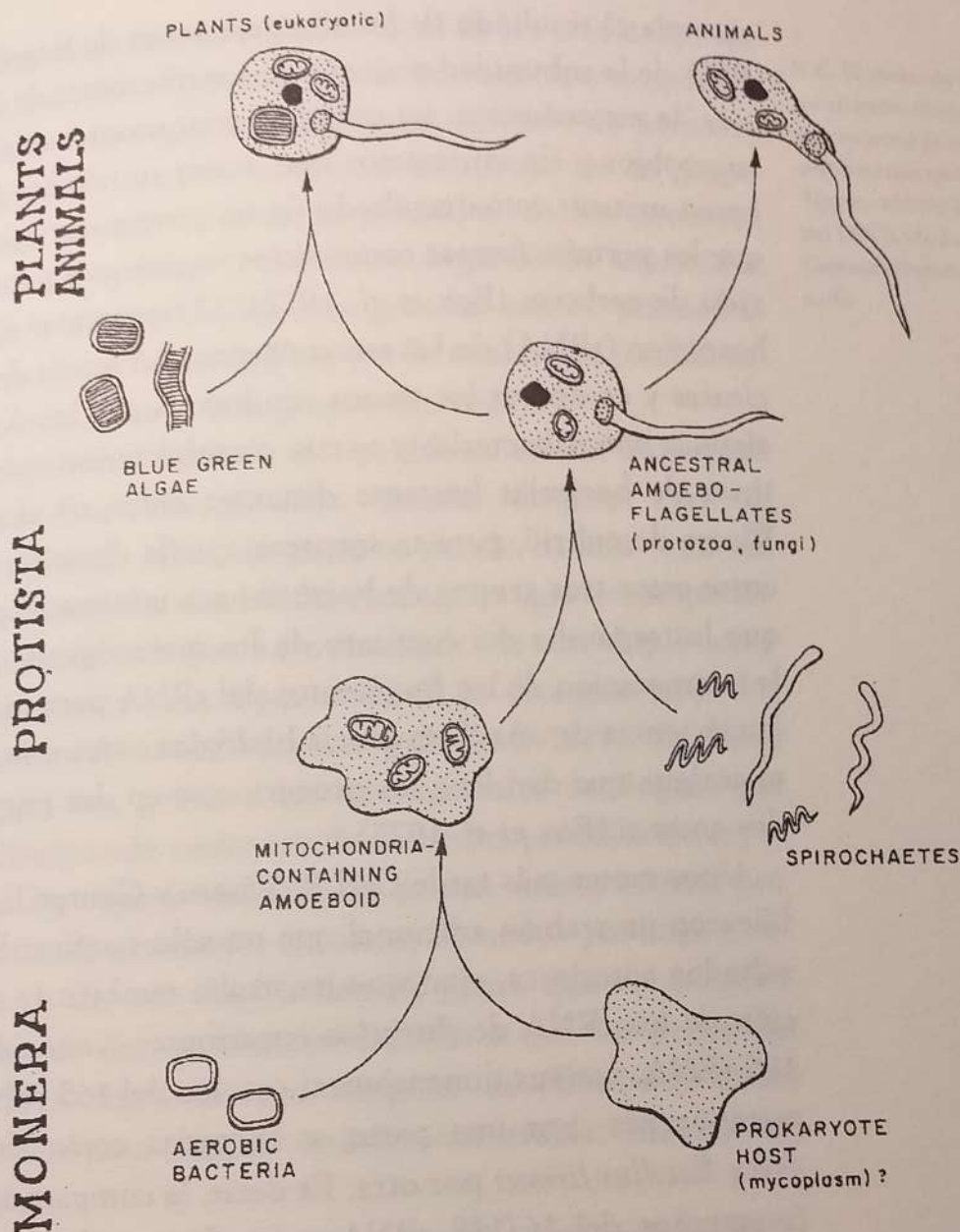


FIGURA 7.2. La propuesta original del origen endosimbiótico de los eucariontes sugerida por Margulis (1970). En esta secuencia la adquisición de las mitocondrias precede la aparición de los orgánulos basados en microtúbulos.

de 1970 la mayoría de los biólogos pensaban que el Reino Monera era una entidad taxonómica homogénea, y que todos los componentes de las células nucleadas (cloroplastos, mitocondrias y el nucleocitoplasma mismo) provenían de un único linaje bacteriano.

Sin embargo, en 1977 Carl R. Woese y sus colaboradores de la Universidad de Illinois publicaron un trabajo que

10. GAIA Y LA COLONIZACIÓN DE MARTE¹ Lynn Margulis y Oona West²

Dedicado a la memoria de Heinz A. Lowenstam (1913-1993)

La hipótesis de Gaia de James E. Lovelock sostiene que la temperatura de la superficie de la Tierra y la química de los gases reactivos, el estado de óxido-reducción y el pH de la atmósfera y de los sedimentos de la superficie se mantienen estables por un mecanismo de homeorresis en el que intervienen el metabolismo, el crecimiento, el comportamiento y la reproducción de los seres vivos.³ El término Gaia, que es el nombre de una temible diosa griega, para Lovelock no es sino «una palabra de cuatro letras⁴ buena que se refiere a la Tierra». También es Ge o Gea (por ejemplo, en el nombre del satélite Geos, o en geología, geografía o Pangea).

La regulación ambiental de Gaia se lleva a cabo principalmente por el origen, crecimiento exponencial y extinción de organismos que están relacionados los unos con los otros por un origen evolutivo común y que están conectados físicamente por la proximidad de las fases fluidas (agua y aire) de la superficie de la Tierra. Los organismos que viven en comunidades forman ecosistemas variables que se han mantenido desde el eón Arqueano. Las interacciones que establecen, dirigidas por la energía solar, producen y eliminan gases de manera tal que los gases nobles, la temperatura y la alcalinidad se mantienen de manera activa dentro de unos límites tolerables para la vida.

En este marco conceptual, las ciencias biológicas y las ciencias físicas parecen apropiadas para analizar la atmósfera

1. Publicado originalmente en 1993 como «Gaia and the colonization of Mars» en *GSA Today* 3 (noviembre):277-280. Recogido en el capítulo «Gaia and the Colonization of Mars», en *Slanted Truths. Essays on Gaia, Symbiosis, and Evolution*, © Springer-Verlag, NY, 1997, pp. 221-234.

2. Oona Snoyenbos-West, Department of Biology, Smith College, Northampton, Massachusetts, MA 01060.

3. Homeostasis es la regulación fisiológica de un conjunto valores fijos, como la temperatura corporal de un mamífero adulto, que suele mantenerse alrededor de 37 °C, mientras que homeorresis, un concepto paralelo, se refiere a la regulación de unos valores variables, como la temperatura, en el embrión de un mamífero a lo largo de su desarrollo.

4. N.T. En inglés, muchas palabras malsonantes tienen cuatro letras (véase capítulo 9).

terrestre y la historia geológica del planeta. El papel de la microbiota es especialmente destacado en el intercambio gaseoso de la superficie, en el que interviene el reciclado de elementos químicos como el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre, que son esenciales para la vida.

La idea de Gaia

La idea de Gaia, que es el resultado de la activa imaginación de un químico atmosférico británico y de un programa internacional de investigación espacial, ha alcanzado su mayoría de edad. La composición de la atmósfera de la Tierra indica sin ninguna duda que el tercer planeta de sistema solar está vivo. Considerando que los dos planetas vecinos a la Tierra, Marte y Venus, son áridos y que en ellos abunda el dióxido de carbono, se invoca a la ciencia de la fisiología o bien a la magia para explicar esta troposfera completamente empapada de agua, que es combustible y cuya composición escapa a las leyes de la probabilidad (véase la tabla 8.2). La hipótesis de Gaia, al reconocer este desequilibrio atmosférico (Margulis y Lovelock 1974), ha optado por la fisiología en vez de hacerlo por la metafísica.

La bibliografía citada en este volumen incluye trabajos que corresponden a más de veinticinco años de contribuciones científicas. Muchos científicos desconocen la cantidad de publicaciones científicas serias y el potencial que representa la idea de Gaia para la integración de datos relativos a la evolución, a la meteorología, a la sedimentología y a la climatología. Desgraciadamente, las publicaciones no científicas sobre Gaia (que suelen ser antiintelectuales y muy exageradas, según el pensamiento de la Nueva Era) han merecido tanta atención y comentarios controvertidos, que una gran parte de la ciencia esencial que hay en Gaia ha quedado oculta.

Si bien el enfoque de Gaia como una ciencia del sistema Tierra se ve muy estimulado por las ciencias que estudian el planeta como un sólido, la mención de la palabra Gaia aún produce apoplejía en algunos medios científicos. Conviene destacarlo, porque hay un gran paralelismo en estos dos tipos de estudios para entender los procesos que se dan en el planeta. En una carta de introducción al informe de 1993 de la Academia de Ciencias de los Estados Unidos (National Academy of Sciences, NAS) sobre las instrucciones para las futuras investigaciones sobre el estudio de la Tierra como un sólido, Frank Press escribe que es preciso «un nuevo enfoque para estudiar los procesos de la Tierra, en los cuales se considere como un sistema dinámico e integrado, y no como una colección de componentes aislados» (National Research Council, 1993). Dicho informe indica la necesidad de estudiar el planeta por

medio de la integración de los procesos biológicos y físicos y aconseja un enfoque global para comprender la Tierra. Aunque la NAS evita usar el término Gaia, lo que pide a los científicos es un enfoque gaiano.

Por parte de la comunidad científica ha habido muchos malentendidos en relación a la hipótesis de Gaia, que hay quien rechaza porque la considera una fantasía de los cantantes de la Nueva Era. George C. Williams (1992), por ejemplo, perpetuó esta confusión cuando difamó a Gaia quizás inconscientemente: «Hubo que abandonar [la idea que el universo está diseñado especialmente para ser una casa adecuada para la vida en general y para la vida humana en particular] en sus primeras formas con el triunfo de la astronomía copernicana [...] pero algunos estudiosos aún creen que es posible defender que la Tierra, como mínimo, puede considerarse adecuada para la vida humana... [La] principal manifestación de esta idea se encuentra en el concepto gaiano de Lovelock y Margulis (1974)».

La hipótesis de Gaia demuestra que las ciencias de la vida son fundamentales para comprender la Tierra, revelando al mismo tiempo la inadecuación de la teoría evolutiva desarrollada sin tener en cuenta la geología y la climatología. La idea de Gaia no se ha hecho popular porque muchos científicos, que desean seguir haciendo su trabajo como de costumbre, no están dispuestos a superar los límites de su campo de investigación. Será necesaria como mínimo una generación para que la comprensión de la hipótesis de Gaia lleve a la investigación adecuada.

Los Vikingos de 1976

Cuando la misión *Viking* de exploración del planeta Marte devolvió sus datos, algunos miembros de la comunidad científica creyeron que la «biología planetaria» o la «exobiología» estaban acabadas porque la ausencia de vida en Marte las convertía en ciencias sin ningún objeto de estudio. Lovelock y sus colegas pensaron lo contrario: ahora que se disponía de datos sobre Marte, las suposiciones especulativas que se hacían al comparar los planetas podían sustituirse por el conocimiento. Se confirmó que el paisaje desértico de Marte está desprovisto de vida (figura 10.1); también que, allí donde se produce, la vida es un fenómeno que se esparce por todo el planeta y que actualmente en el sistema solar sólo hay seres vivos en la biosfera de la Tierra.

Se ha llamado Gaia a la diosa de la Tierra o a la Tierra considerada como un organismo. Estas frases pueden conducir a conclusiones equivocadas. Dado que muchos artículos científicos que mencionan a Gaia están afectados de terminología mal entendida, presentamos aquí una explicación de la hipótesis de Gaia desde el punto de vista fisiológico.



FIGURA 10.1. Vista del regolito marciano desde el *Viking* (en primer plano). La superficie es roja debido al ion férrico. Cortesía de la NASA.

Rechazamos la analogía de que Gaia es un organismo individual, principalmente porque no hay ningún organismo que se nutra de sus propios residuos ni que recicle por sí mismo su propio alimento. Es mucho más apropiado decir que Gaia es un sistema interactivo cuyos componentes son seres vivos. Esto se hace especialmente evidente en los ejemplos de la influencia de la vida en algunos de los principales procesos geológicos (tabla 10.1, Westbroek 1991).

Los datos aportados por las dos naves que orbitaron Marte y se posaron en el planeta en las misiones *Viking* 1975-1976 fueron un complemento de anteriores observaciones hechas desde la Tierra. No se detectaron compuestos orgánicos; si los hay, su concentración debe de ser inferior a una parte por mil millones. La detección de oxígeno en la cromatografía de gases no se debía a la existencia de vida, sino a la liberación de O_2 a partir de peróxidos humedecidos, y la incorporación de CO_2 se debía a reacciones fotoquímicas causadas por radiaciones cósmicas como las radiaciones ultravioleta y no a una reacción fotosintética. En aquellos experimentos, una vez se extinguían los agentes reactantes ya no se detectaba ningún otro tipo de cambio. La conclusión no podía ser otra: no hay pruebas de la existencia de vida actual en Marte, como pasa con Venus.

Por lo que se sabe hasta ahora, el fenómeno Gaia está limitado a la Tierra. ¿Podría extenderse a Marte mediante la colonización de aquel planeta? La comparación de la Tierra con Marte ayuda a destacar tanto la naturaleza de Gaia como las implicaciones de esta idea en el estudio de la Tierra.

Gérmenes extraterrestres

Para impedir que las naves de las misiones que llevaron a la Luna y a Marte transportasen microorganismos se aplicaron las técnicas que se usan para mantener las «salas blancas». Incluso se esterilizó la parte exterior y gran parte del interior de la nave *Viking*. Para ello se echó óxido de etileno sobre los componentes accesibles para asegurar que no había contaminación microbiana. Esto aumentó el coste total de la misión *Viking* en un 10 por ciento. Durante las misiones *Apollo* a la Luna, en las décadas de 1960 y 1970, se temía la posible «retrocontaminación»: «microbios» extraterrestres podían «contaminar» la Tierra. Este tema seguramente surgirá de nuevo si en el futuro se recupera el material enviado a Marte. Dado que en muchas ocasiones han llegado a la Tierra meteoritos procedentes de Marte, dicho temor parece infundado; es más bien una manifestación de ciencia ficción que un tratamiento razonado de la probabilidad científica.

TABLA 10.1. Fenómenos geológicos mediados por la biota

Ejemplo	Importancia	Reservas litosféricas y ejemplos
1. Ciclo del fósforo	<p>Esencial para toda la vida: el fósforo es un componente de los ácidos nucleicos (DNA y RNA); del ATP y de otros nucleótidos; de los fosfolípidos de las membranas; y del fosfato cálcico de los huesos. Dado que el fosfato es un nutriente importante que limita el crecimiento, el ciclo del fósforo está completamente mediado por la biota (Madigan <i>et al.</i> 1997, Filipelli y Delaney 1992).</p> <p>Esencial para la formación de las partes duras de los animales marinos con caparzones y muchos protostistas testáceos, e.g., los foraminíferos. Ayuda a mantener el equilibrio de pH en el mar. Como la caliza, es un sumidero importante de CO_2.</p>	<p>Sedimentos de la corteza terrestre y de los fondos marinos; islas de guano. La fosfina atmosférica (PH_3) es despreciable.</p>
2. Deposición de carbonato cálcico	<p>Conduce a la aparición de condiciones anóxicas y producción de CH_4, de forma que el carbono es liberado a la atmósfera, lo que impide su pérdida completa de la biosfera y conlleva el mantenimiento de niveles de O_2 elevados (Watson <i>et al.</i> 1978). Combustibles fósiles.</p>	<p>Estromatolitos. Arrecifes de coral. Limo carbonatado del fondo marino (foraminíferos y coccolitos).</p>
3. Deposición de materia orgánica	<p>La composición de la atmósfera terrestre (e.g., presencia de metano, ozono) es inexplicable en ausencia de la vida (Watson <i>et al.</i> 1978, tabla 1).</p>	<p>Aceite bituminoso y otros esquistos ricos en materia orgánica. Carbón, turba, petróleo, arenas alquitranadas.</p>
4. Metanogénesis	<p>Los sedimentos no consolidados son atrapados por comunidades bióticas, e.g., la cubierta mucilaginosa de los tapetes bacterianos (Margulis y Stolz 1983).</p>	<p>Yacimientos de gas natural, gas de los humedales y pantanos. Intestino de los artrópodos. Mamíferos rumiantes. Barro. Sedimento no litificado.</p>
5. Consolidación de regolitos	<p>Velocidades de erosión aceleradas por la acción biológica, bacterias endolíticas, hifas fúngicas, líquenes y raíces de plantas.</p>	<p>Interfases litosfera-hidrosfera-atmósfera.</p>
6. Aceleración de erosión	<p>Génesis de depósitos minerales importantes. Interpretación de ambientes modernos y antiguos.</p>	<p>Formación de hierro en bandas. Depósitos de oro en Witwatersrand (Sudáfrica). Hierro de las turberas. Nódulos de manganeso.</p>
7. Formación de minerales mediada por la microbiota (biomineralización)		

Aunque algunos investigadores, como Rothschild (1990), han sugerido que aún podría encontrarse vida marciana en oasis, quizás en forma de bacterias en el permafrost, o incluso como «endoevaporitas» en cristales de sal aislados, la probabilidad de encontrar vida aislada es muy baja.

La hipótesis de Gaia aportó el marco para la evaluación de los resultados del estudio de Marte. La vida mantiene el ambiente que hay a su alrededor y en la Tierra se encuentra sólo como un fenómeno extendido por todo el planeta. Es posible que la vida estuviese dispersa en sus inicios y que también se encuentre dispersa cuando esté desapareciendo, como ha destacado Lovelock. Pero entre estos dos puntos extremos la vida tiene que ser exuberante. Y tiene que serlo por su tendencia intrínseca a crecer, expandirse y formar poblaciones de manera exponencial y por su capacidad de dispersión. Por tanto, una pregunta que nos hacemos en la década de 1990 es «¿puede expandirse la vida a Marte?». La pregunta «¿puede colonizarse Marte?» equivale a preguntar «¿puede reproducirse Gaia?».

Todos los organismos están en contacto a través de la atmósfera y la vida como la conocemos en la Tierra es un fenómeno planetario, que depende en gran parte de la luz del Sol. Algunas formas muy resistentes de nuestro planeta, como las arqueobacterias halófilas o los microorganismos acidófilos, que crecen mejor a partir de azufre, los quimiolitotrofos oxidadores de amoníaco o las cianobacterias formadoras de estromatolitos, que precipitan carbonato, se encuentran en los extremos y están conectados por una biota planetaria ubicua que los tolera. No se producen virtuosismos individuales. Si hubiese vida en Marte, por analogía con la Tierra debería encontrarse formando comunidades.

Aunque en teoría es posible que se encuentre vida en las regiones más bajas de los desiertos de Marte, es mucho más probable que los terrenos yermos estén tan muertos como aparentan. Si es así, sería un reto científico lograr invertir el mismo proceso que tanto se temía: contaminar deliberadamente o, como se dice ahora, «sembrar» Marte con vida procedente de la Tierra.

Ecopoyesis

La búsqueda de vida en Marte se inició (mediante el telescopio) mucho antes de que se llevasen a cabo las misiones *Viking* y seguramente no terminará con el desplegamiento de vehículos todo terreno en su superficie a principios del siglo XXI. Después de la confirmación admisible de que Marte está deshabitado, la próxima tarea tendría que ser la «siembra» del planeta rojo con propágulos de la Tierra. (Mucha

gente argumentará de manera justificada que hay problemas más urgentes, con origen en la Tierra, cuya resolución debería tener prioridad, como frenar la tendencia humana a convertir la superficie de nuestro planeta en un ecosistema urbano o fomentar y documentar la diversidad biológica.)

La primera –y seguramente la principal– tarea que hay que hacer para convertir Marte en un planeta habitable es aumentar la temperatura de su superficie. Las propuestas que se han hecho para alcanzar este objetivo van desde fundir sus casquetes polares mediante unos espejos gigantes que orbitarían el planeta o cubrir la superficie con líquenes negros, hasta esquemas para enviar a su atmósfera cohetes de clorofluorocarbonos (CFC), que causan el efecto invernadero. Algunas propuestas recientes son más detalladas y algo más factibles, aunque comparten con las anteriores una fuerza y una debilidad simultáneas: aunque son esquemas bastante ambiciosos que logran estimular la imaginación, como se ve en las ilustraciones de divulgación científica, son demasiado grandiosos y poco definidos para ser prácticos (Kluger 1992).

Por ejemplo, supongamos que en la superficie de Marte pudiesen producirse in situ unos cuantos millones de toneladas de CFC resistentes a los rayos ultravioleta. ¿Qué pasaría después? Incluso en el caso que se formasen océanos por la fusión del hielo atrapado en las latitudes más bajas, porque se hubiese hallado la manera de devolver a la atmósfera el CO_2 que ahora está atrapado en los carbonatos de la superficie, ¿qué ocurriría? La densidad (y por tanto la posibilidad de vida) de la atmósfera marciana seguramente está limitada de manera intrínseca por la debilidad del campo magnético de aquel planeta. En ausencia de desviación magnética del viento solar, cualquier atmósfera se disiparía muy pronto. Incluso si se creasen microorganismos y plantas modificados genéticamente para producir oxígeno a una velocidad hasta ahora sorprendente, aún se tardaría, como dice Christopher McKay (del Centro de Investigación Ames de la NASA), casi mil años para construir una atmósfera con una concentración estable de oxígeno en los gases transportadores en la respiración de los microorganismos eucariotas, por no hablar de la respiración humana.

La nueva ciencia de la geofisiología y el éxito de la biotecnología con los microorganismos puede habernos incitado a dejar correr la fantasía sobre el diseño planetario. No obstante, imaginar la colonización de Marte de manera que las personas puedan caminar al aire libre por sus cañones es aún una fantasía lejana. Habría que distinguir entre ecopoyesis (Haynes 1990, 1992; la inundación de una superficie anteriormente deshabitada con sistemas vivos viables) y «terraformación» (McKay 1987; la recreación de la Tierra en la superficie de otro planeta). Para un futuro previsible, la ecopoyesis, pero no la terraformación al por mayor, parece una posibilidad

para Marte. Además, la ecopoyesis es necesaria para la terraformación (McKay *et al.* 1991). La ecopoyesis no haría de Marte un paraíso terrenal; más bien lo transformaría en un albañal global; quizás lleno de color, pero exhalando abundantes efluvios mefíticos. Al fin y al cabo, las primeras fases de la historia de la Tierra y el estado actual de los gigantes gaseosos en la parte externa del sistema solar se caracterizan por una composición química más parecida a la de una alcantarilla que a la de un alimento. Estos compuestos de azufre reducidos, ricos en carbono y volátiles son ajenos a los mamíferos e inhóspitos para dichos animales. Sin embargo, fueron esenciales para el origen de la vida y para su evolución temprana.

La única manera segura de convertir la superficie de un planeta en un lugar apto para la vida puede ser repetir el proceso de colonización evolutiva que se dio en la Tierra, que empezó con hidrógeno, metano, amoníaco, formaldehído, sulfuros, nitrilos y azúcares sencillos. Poco tiempo después del origen de la vida se produjeron intercambios de gases nocivos entre bacterias fototrofas anoxigénicas y las que dependían de ellas. El resultado de un proceso similar en Marte, deliberadamente activado y acelerado, es muy difícil de prever; podría ser incluso trágico.

¿Nos atreveremos los humanos, como si fuésemos dioses, a agitar nuestra varita mágica? ¿De veras creemos, en nuestra ingenuidad, que dispersando nuestro instrumental científico por la superficie roja de Marte con la ayuda de unos robots convertiremos aquel lugar en un nuevo planeta azul en un espacio de tiempo que, en un contexto geológico, sería como un abrir y cerrar de ojos? Es mucho más probable que Marte sea colonizado poco a poco y de manera gradual, y no por la humanidad, sino mediante la humanidad facilitada por los robots. En cuanto a lo que se puede predecir del futuro, parece probable que la única presencia humana en Marte se haga a través de la tecnología de telepresencia que se está desarrollando. El aterrizaje en Marte en 1976 de dos vehículos *Viking* para la teledetección conectados a la humanidad y controlados a distancia prueba que el proceso de colonización ya ha empezado. A diferencia del «paso para el hombre» que fue «un gran paso para la humanidad», en palabras de Neil Armstrong que marcan el inicio de una época, el inicio de la ecopoyesis en Marte no tiene un momento que se pueda reconocer instantáneamente. El lanzamiento a Marte de detectores contruidos en la Tierra, las cámaras sensoriales «telepresentes» que envían por radio sus señales a un puñado de personas que esperan impacientes en el centro de emisión espacial, los primeros aterrizajes de una tripulación del espacio, la instalación de las primeras estaciones orbitales y la población final de la superficie roja por inmigrantes de especies diversas, todo ello forma parte de un proceso gradual de ecopoyesis. Todo podría pasar por azar y sin apenas dependencia de un proceso consciente de bioingeniería planetaria.

Desde el punto de vista de Gaia, la distinción entre cambiar el propio cuerpo para adaptarse a cualquier ambiente inhóspito o alterar el mismo ambiente es capciosa. A medida que los organismos evolucionan, tanto su cuerpo como el ambiente cambian de manera irreversible. Dichos cambios se producen mediante la tecnología, que no es un fenómeno exclusivamente humano. Existen muchos casos de tecnología no humana, animada o inanimada, como los panales de las abejas, o los termómetros, que tienen aire acondicionado y control de la humedad, o los inmensos arrecifes coralinos que rodean las islas tropicales.

Propágulos de Gaia

La vida, para su dispersión, empaqueta su valioso contenido: produce endosporas de bacterias que resisten las altas temperaturas, cistos de protoctistas dinomastigotes, semillas y frutas de algunos árboles con la cubierta endurecida, huevos de serpiente que parecen de goma. O las cajas de huevos, duras, de la raya. Entre los propágulos más destacados se encuentran los «odres» de los tardígrados o los huevos de los langostinos de las salinas, una especie de polvillo que resiste la sal de aquel ambiente (figura 10.2).

Para que cualquier hijo de la Tierra pueda vivir en la superficie de Marte, seguramente habrá que disponer de unos espacios cerrados como burbujas gigantes que contengan gran variedad de especies que establezcan sistemas de reciclado autosostenibles. En principio podría inspirarse en el exorbitante proyecto Biosfera II del desierto de Sonora, en Arizona. Este propágulo incipiente (que «germinó» y liberó su contenido en septiembre de 1993) contenía ocho «biosferianos». Las instalaciones, que ocupaban casi siete hectáreas, se suponía que habían sido «materialmente» aisladas del exterior en septiembre de 1991, excepto para el enorme consumo de energía eléctrica que les llegaba de fuera. Es evidente que por ahora estamos muy lejos de establecer cualquier tipo de biosfera en Marte. La energía necesaria para el sostenimiento de cualquier instalación de esta clase, por no hablar de su uso como bases para algún tipo de modificación bioindustrial del planeta, haría necesaria la producción de energía nuclear allí mismo. No obstante, en cuanto se establezcan biosferas artificiales cerradas adecuadamente, por ejemplo para servir de campamentos base para fábricas de clorofluorocarbonos (CFC), podrá decirse que la vida terrestre biosférica y global habrá colonizado la superficie de Marte como quien no quiere la cosa.

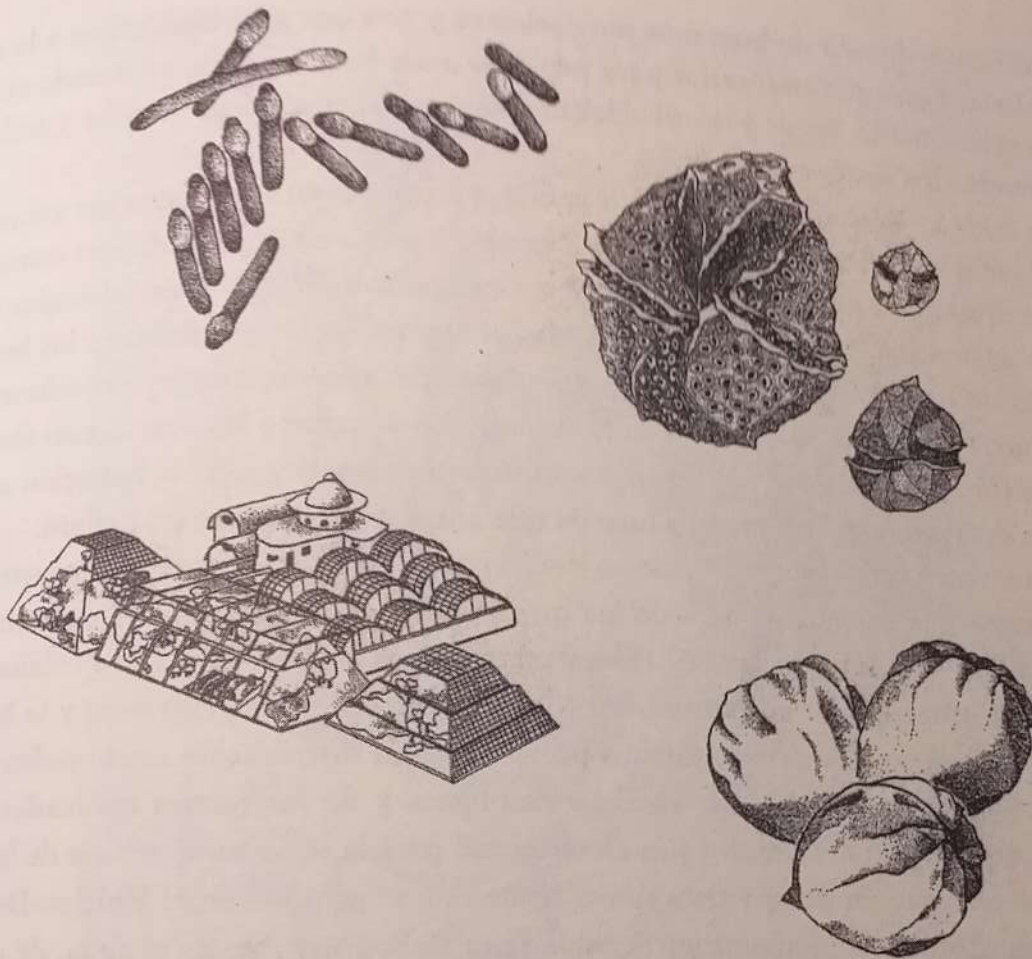


FIGURA 10.2. Propágulos: en el sentido de las agujas del reloj desde la parte superior izquierda, endosporas bacterianas, cistos de dinomastigota (en la terminología paleontológica, histri-cosferas), nueces y posible biosfera futura. Dibujo de Sheila Manion-Artz.

Una biosfera artificial de este tipo, una forma resistente a la desecación y a las radiaciones recuerda mucho las innovaciones evolutivas no humanas a gran escala que tienen más continuidad con el pasado de lo que parece a primera vista. Mediante el empaquetamiento y la miniaturización de lo que es esencial para la supervivencia, la vida se arriesga a salir y termina haciéndose un hogar en un terreno que antes le era hostil.

La ecopoyesis de Marte seguramente se llevaría a cabo mediante la interacción de muchos tipos de organismos de la Tierra: bacterias, protoctistas (principalmente algas), plantas y hongos desempeñarían cada uno su papel. Indirectamente, todas las formas de vida intervendrían en la colonización del planeta, aunque al principio tendrían que construirse bases de múltiples especies en un esfuerzo planeado por un

número muy reducido de humanos muy selectos y con una gran dedicación a lo que hacen. Estas bases son necesarias para proteger a sus habitantes de un mundo exterior que inicialmente les será hostil. Habrá que establecer algunos cultivos y reciclar internamente los residuos.

Que estas instalaciones cerradas de metal, vidrio y plástico puedan ser construidas por científicos, ingenieros y otros trabajadores no es un argumento que convenza de su exclusividad. En todos los avances tecnológicos de la evolución biológica (por ejemplo, la aparición del frústulo silíceo de las diatomeas, de los dientes y los huesos de calcio de los vertebrados, de la lignificación que permite crecer verticalmente a las plantas, y de los exoesqueletos de quitina de los insectos y los crustáceos) intervino más de un tipo de vida y dichos avances fueron necesarios para la radiación adaptativa de sus inventores en medios nuevos que antes les resultaban un peligro.

Los humanos no tienen la exclusiva de la tecnología. Los dientes de magnetita de los moluscos y la síntesis de cera de los himenópteros son tecnologías que precedieron en millones de años a las del *Homo sapiens*. Los dientes de fosfato cálcico, los sensores de gravedad de sulfato de bario, y el control de la temperatura y la humedad en los termiteros fueron requisitos previos para la distribución cosmopolita en el Cenozoico de los roedores, de las algas carofíceas y de los termes cultivadores de hongos, como lo son el teléfono y la electricidad para la expansión urbana de los humanos. La emigración de la vida a tierra firme que se produjo en el Silúrico-Devónico, con los problemas concomitantes de la falta de soporte que da el agua, de carencia de sustratos nutritivos y de la exposición continuada a las radiaciones solares ultravioleta, exigían un gran cambio en el «empaquetamiento» de los recursos biológicos —la incorporación al interior del cuerpo de lo que anteriormente sólo podía encontrarse «fuera»— en aquel ambiente mineral (Sagan 1992).

Dicho empaquetamiento de seres vivos y su equipo podrían iniciarse en enclaves para el reciclado, «biosferas artificiales». Por encima y más allá de cualquier cosa que se hiciese posteriormente, la primera de estas bases sobre terreno marciano ya representaría la colonización de Marte. Los historiadores del cosmos, en retrospectiva, podrían considerar la fecha del establecimiento de dichos campamentos base en Marte para datar la reproducción de vida planetaria. Esas «biosferas artificiales» podrían ser reconocidas no sólo como una obra de la tecnología humana, sino como una forma de expansión y metamorfosis de la biosfera original de la Tierra por miembros de los cinco reinos de la vida (figura 10.3). Gaia se habría reproducido, retando así la objeción de Doolittle (1981) que niega que Gaia pueda considerarse una forma de vida porque no tiene capacidad de reproducción. Desde la distancia, la colonización de Marte se ve como la gemación, la siembra a través del espacio de

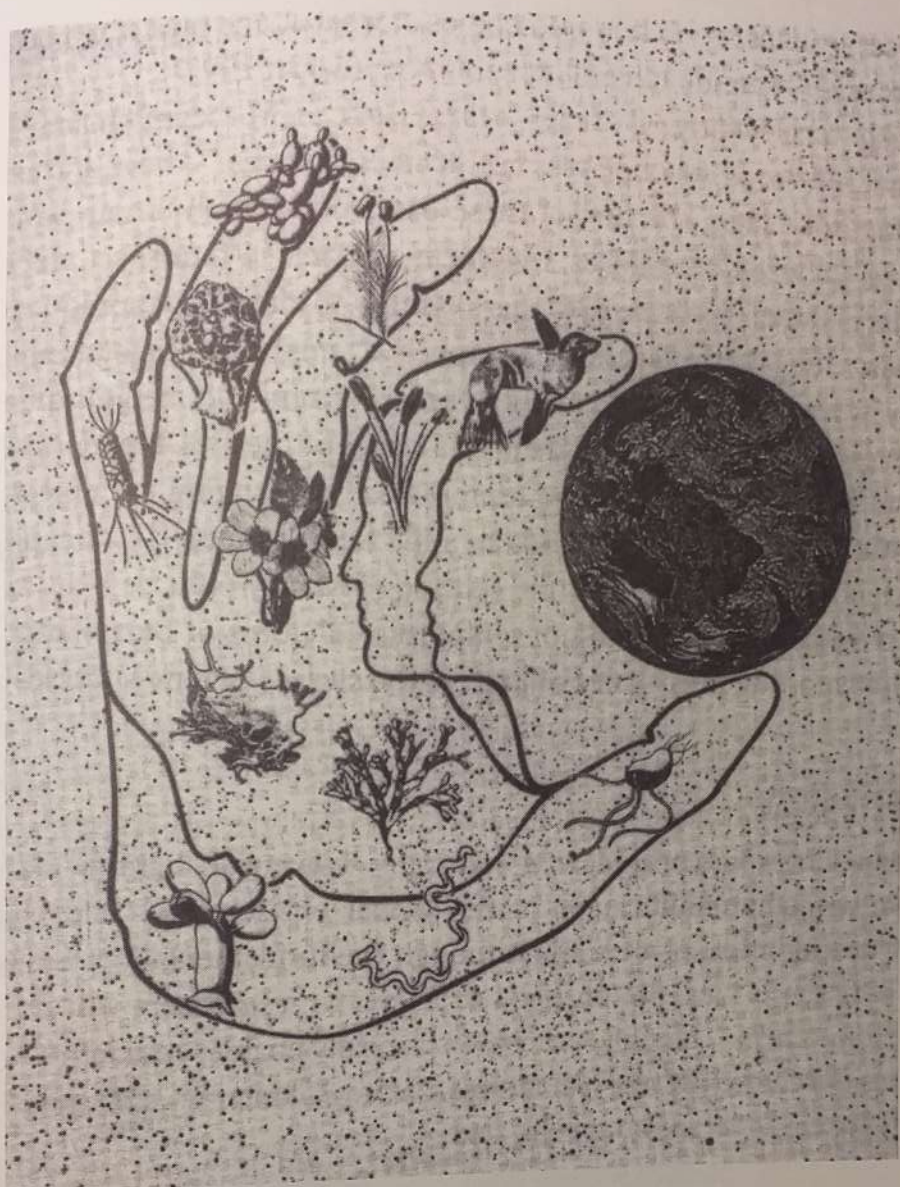


FIGURA 10.3. La mano de los cinco reinos que representa las principales formas de vida, todas conectadas a través de casi 4.000 millones de años de «tiempo darwiniano» sobre la superficie terrestre («espacio vernadskiano»). Por orden de aparición en el registro fósil (Ga = mil millones de años): Moneras (bacterias o procariotas, 3.9 Ga), protoctistas (algas, mohos, ciliados y otros eucariotas microscópicos y sus descendientes de mayor tamaño, 2 Ga), animales (diploides que forman embriones por fusión de óvulo y espermatozoide, 0.65 Ga), hongos (zigosco-, basidiomicetos, hongos imperfectos y líquenes que crecen a partir de esporas fúngicas, 0.45 Ga), plantas (haplodiploides: briofíticos o traqueofíticos que se desarrollan a partir de embriones retenidos en el seno materno, 0.45 Ga). Esta ilustración diseñada por Dorion Sagan figura en la portada de *Five Kingdoms* (Margulis y Schwartz 1998).

una forma esporulada de vida biosférica: Gaia transportando propágulos de sí misma a la superficie de un nuevo mundo.

Conclusiones

Una visión gaiana científica del mundo es especialmente relevante a la luz de las modificaciones del ambiente planetario causadas por los humanos y de lo que se dice sobre futuras misiones en Marte. Aunque las bases de la hipótesis de Gaia no han cambiado en veinticinco años, aún hay investigadores que no las entienden. Una visión gaiana permite investigar de manera crítica en los sistemas excluidos por esas desigualdades que se dan en el «*apartheid* académico» que Lovelock abandonó en su juventud.

El concepto gaiano de la regulación fisiológica de la superficie no es fácil de aceptar, especialmente por quienes mantienen ideas dogmáticas sobre los procesos que se dan en la Tierra. Lovelock ha comentado (en el programa para la BBC «La diosa de la Tierra») que la hipótesis de Gaia no había sido discutida sino, sencillamente, ignorada. Pero los detalles científicos contenidos en la bibliografía citada aquí empiezan a conocerse mejor. Confiamos en que toda la importancia de la idea de Gaia vaya siendo cada vez comprendida mejor por científicos y estudiantes, especialmente por los geólogos, ya que de ellos depende la futura investigación científica sobre Gaia.

11. UNA ENFERMEDAD LLAMADA HOMBRE¹
Lynn Margulis

Mi título es de Nietzsche, que hace cien años dijo que «la Tierra es un lugar hermoso, pero tiene una enfermedad llamada hombre».

En primer lugar, me gustaría considerar la filosofía y los filósofos. A los científicos les molesta la filosofía. Creo que es porque tienen miedo de que los filósofos revelen lo que realmente hacen los científicos. Estoy de acuerdo con la afirmación de Kierkegaard que, cuanto menos respaldo tiene una idea, más fervientemente debe creerse. Una idea totalmente absurda requiere una fe plena inquebrantable.

Tengo la impresión de que nuestra cultura rebosa de ideas absurdas, creídas con fe inquebrantable por los científicos y todos los demás, y que algunas de éstas incluso vician nuestro posible interés por la Tierra.

La ciencia moderna ha dado importantes oportunidades para comprender la vida, pero nuestra cultura nos impide aceptarlas y utilizarlas. Utilizo cuatro ejemplos fundamentales: la Tierra desde el espacio; los pueblos Chewong de los bosques de Malasia; los organismos del microcosmos, que en una gran mayoría no son tenidos en cuenta por los biólogos; y las lecturas de Gaia, la visión de Vernadsky/Lovelock de la vida más allá de la biología.

Nietzsche entendía por filosofía «un explosivo terrible en cuya presencia todo está en peligro». Los científicos tienen

1. Publicado originalmente en 1995 como «A Pox Called Man» en *Science for the Earth*, T. Wakeford y M. Walter, eds. John Wiley and Sons, NY, pp. 19-37. Recogido en el capítulo «A Pox Called Man», en *Slanted Truths. Essays on Gaia, Symbiosis, and Evolution*, © Springer-Verlag, NY, 1997, pp. 247-261.

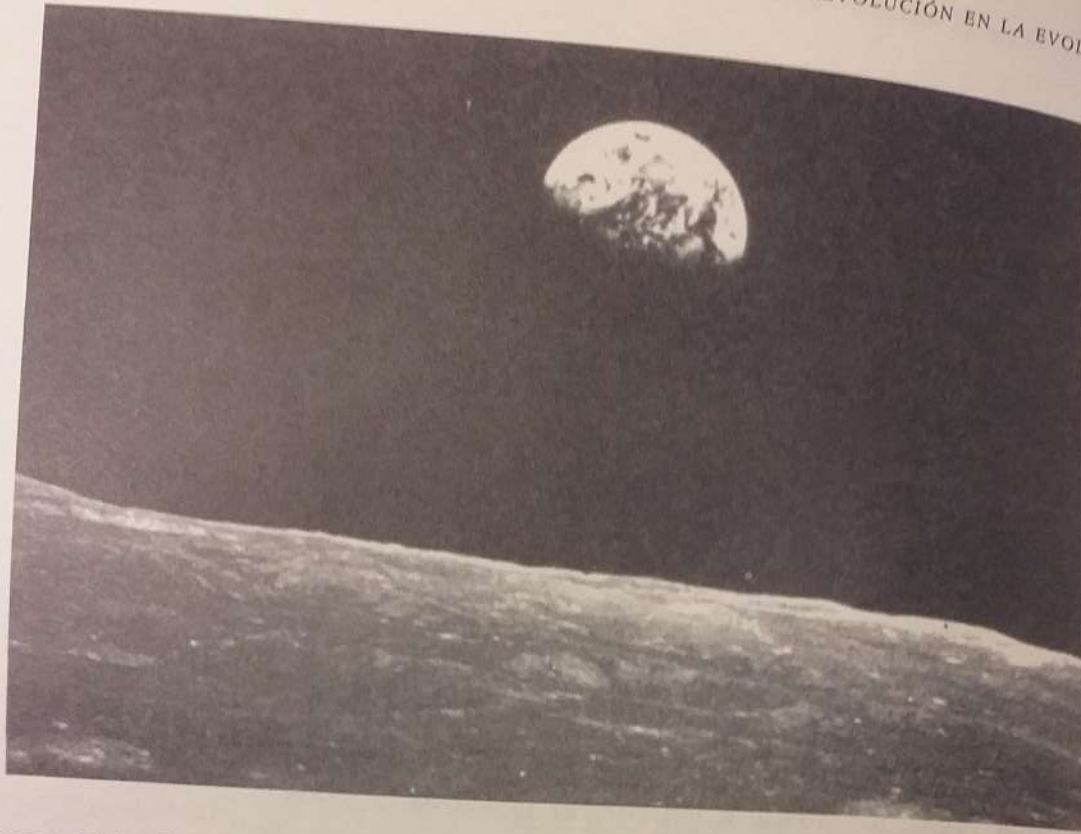


FIGURA 11.1. La Tierra empieza a asomar sobre el paisaje lunar. Foto cedida por NASA.

pánico tanto de la filosofía como de los filósofos. Tienden a denunciar a la filosofía como «blanda» o a negar su relevancia, cuando de hecho tiene mucho que decir sobre lo que hacen los científicos.

La Tierra desde el Espacio

La imagen de la Tierra desde el espacio (figura 11.1) transformó a todos los cosmonautas y astronautas. Desde entonces han intentado explicar al público su cambio filosófico, pero les parece que nadie les escucha. Frank White publicó un libro que contenía entrevistas a todos los cosmonautas y astronautas vivos, que nos introduce con ellos en el espacio, investigando. Por ejemplo, Eugene Cernan, la última persona que fue a la Luna, dice:

C
gos,
sobre
desie
ta de
C
va. A
sobre
océa
Suda
pue
tod
real

este
arri
pec

Los a

mensaje.

Júpiter,

estudiam

mos hijo

winista

sentido

para nue

planeta

educado

todo. C

dades»

reparos.

Por

cala del

imagen

cha a iz

líneas?

urbaniz

que est

lados fi

mo de

Cuando estás en la órbita de la Tierra, al mirar hacia abajo ves lagos, ríos, y penínsulas como Florida o Baja California. Rápidamente sobrevuelas una topografía cambiante: montañas cubiertas de nieve, desiertos o zonas tropicales —todo muy visible. Ves la salida y la puesta del sol cada noventa minutos.

Cuando estás en la órbita de la Tierra tienes una nueva perspectiva. Ahora estás sobre los Estados Unidos y al minuto siguiente estás sobre otra zona del mundo. Puedes ver de polo a polo y de océano a océano sin girar siquiera tu cabeza. Literalmente ves Norteamérica y Sudamérica esconderse conforme la Tierra gira sobre un eje que no puedes ver, y luego, milagrosamente, Australia, luego Asia, después toda América surge para reemplazarlos. Te preguntas «¿dónde estoy realmente en el espacio y en el tiempo?».

No ves las barreras de color, de religión y de política que dividen este mundo. Te preguntas, si pudieras llevar a toda la humanidad allá arriba, ¿no cambiaría su sensibilidad? ¿no tendría una nueva perspectiva?

Los astronautas y cosmonautas tratan de transmitir ese mensaje. Los científicos que estudian otros planetas (Marte, Júpiter, Venus) los estudian de manera global, pero los que estudiamos la Tierra no lo hacemos así. ¿Por qué? Porque somos hijos de una religión judeocristiana, musulmana, neodarwinista o cualquier otra. Estas religiones son absurdas en el sentido de que no sólo son confusas, sino que son peligrosas para nuestra relación con la Tierra y nuestros compañeros de planeta no humanos. El contexto cultural en que nos han educado nos impide el conocimiento de la Tierra como un todo. Cuando los resultados científicos chocan con las «verdades» culturales y religiosas no establecidas, la ciencia pone reparos.

Por ejemplo, la teledetección nos dice mucho sobre la escala del macrocosmos. La figura 11.2 es una extraordinaria imagen de satélite de un río de la Amazonia (que va de derecha a izquierda) cerca de Rondonia, en Brasil. ¿Qué son esas líneas? ¿Una variante de los círculos de algún cultivo? ¿una urbanización deshumanizadora? A ras del suelo podemos ver que estas líneas realmente son caminos que tienen a ambos lados franjas de selva destruida (figura 11.3). El enorme ritmo de deforestación lo convierte en un fenómeno global.

nuestra cultura es dinero. Todo lo que vemos es dinero. Sólo vemos dinero. Mientras tanto, los bosques se queman, los ríos y océanos se contaminan, los niños se abandonan, y la gente muere de hambre.

Los organismos del microcosmos

¿Qué enseñanzas podemos recibir de la biología? ¿Y de la ciencia? ¿Qué nuevas enseñanzas surgen del estudio de los organismos subvisibles del microcosmos?

Los únicos seres que se encuentran en el extremo de la cadena de producción son las cianobacterias. Estos genios verdes convierten la luz del sol en materia orgánica y liberan gases a la atmósfera. Muchos de ellos da la casualidad que están atrapados dentro de las plantas. La productividad es actualmente –y lo ha sido siempre– un virtuosismo bacteriano, especialmente de las cianobacterias. En última instancia, el producto nacional bruto de una nación sólo puede ser biológico, no industrial.

Por la biología estudiada en la escuela sabemos algo sobre la variación biológica, cambios en caracteres, cambios en el DNA y simbiogénesis. Sabemos algo sobre la herencia de la variación y el potencial biótico –se producen más individuos de los que de alguna manera pueden sobrevivir en las poblaciones de todas las criaturas en cualquier época. Sabemos que la forma más eficaz de liberarse de organismos como las cucarachas no es matarlas una a una sino alterar completamente su hábitat: para fomentarlas, dales más hábitat. Conocemos los efectos de la superpoblación. Sabemos que la basura nunca se elimina, sino que circula. Sabemos que la materia nunca se pierde sino que circula. Sabemos que las células de las personas no albergan antiguas bacterias fotosintéticas de vida libre que todavía fotosintetizan activamente, mientras las de las plantas sí lo hacen.

Sabemos que hay límites naturales al crecimiento de cualquier población. Esto no puede enseñarse porque nuestra

cultura nos dice que los humanos dominan la Tierra. Y la cultura sólo ve dinero. Sabemos que el hacinamiento produce destrucción. Sabemos que produce luchas y otros extremos de comportamiento. Cuando los mamíferos viven amontonados, se produce un comportamiento agresivo: incluso los herbívoros se vuelven caníbales si están muy amontonados y pasan hambre. Sabemos todo esto. ¿Por qué no hacemos algo para remediar todo eso? Porque nuestras presunciones culturales contradicen este conocimiento.

Del microcosmos nos llegan otras enseñanzas. Sabemos que el mundo viviente no está habitado sólo por animales y por plantas. Para la microbiología, las plantas son prácticamente idénticas a los animales. Esto divide la vida en el mundo bacteriano y todo lo demás. Sabemos que la vida empezó hace tres mil quinientos millones de años, mientras los animales aparecieron hace menos de 700 millones de años. La mayor parte de la evolución no ha implicado a los animales en absoluto, y sin embargo, casi todos nuestros estudios de evolución son de animales (figura 11.4).

Los protoctistas, 250.000 especies aproximadamente, son mudos y carecen de poder. No obstante, inventaron casi todo lo que puede interesar a los evolucionistas. El desarrollo de los sexos, la fusión celular y la motilidad intracelular son fenómenos propios de los protoctistas. Los protoctistas forman el quinto reino junto a los de las plantas, los animales, los hongos, y las bacterias (figura 11.5). Los protoctistas constan de células nucleadas (eucariotas) y no son ni hongos, ni plantas ni animales. La simbiogénesis, mi tema preferido, participa en la especiación de todos los protoctistas y de muchos otros organismos eucariotas. Nuestro mundo cultural se divide en «plantas, animales y gérmenes», presagiando todos ellos una falta continuada de poder para los protoctistas (Margulis *et al.* 1993).

En Shark Bay, en el oeste de Australia, aún existen ecosistemas de cianobacterias en zonas cuya salinidad es excesiva para la mayoría de los organismos. En ese punto de la costa australiana, las comunidades de cianobacterias han creado