



REFERENCIAS

Lynn Margulis
Planeta simbiótico

Un nuevo punto de vista
sobre la evolución

Se

Aunque la teoría de la evolución de Charles Darwin descansaba sobre los fundamentos de la biología moderna, no revelaba todos los datos. Darwin y sus sucesores han mostrado de modo muy convincente cómo opera la selección natural sobre la variabilidad de las especies, pero sin responder a la cuestión de cómo los diferentes organismos acaban por ocupar un lugar más o menos privilegiado.

En *Planeta simbiótico*, la científica Lynn Margulis muestra que la simbiosis es crucial para los orígenes de las novedades evolutivas. Abarcando desde las bacterias, las formas de vida más pequeñas, hasta las más grandes, la propia tierra. Margulis explica el origen simbiótico de muchas de las más importantes innovaciones de la evolución. Las mismas células de las que estamos hechos comenzaron siendo uniones simbióticas de diferentes tipos de bacterias. Y como todos los seres vivos están bañados por las mismas aguas y atmósfera, todos los habitantes de la tierra pertenecen a una gran unidad simbiótica. Contemplado desde el espacio, Gaia, el ecosistema de la superficie terrestre, es sólo una gran simbiosis.



Lynn Margulis

Planeta simbótico

ePub r1.1

TaliZorah 23.07.13

Título original: *Symbiotic Planet*

Lynn Margulis, 1998

Traducción: Victoria Laporta Gonzalo

Ilustraciones: Christie Lyons, Laszlo Meszoly, Kathryn Delisle y Dorion Sagan

Retoque de portada: TaliZorah

Editor digital: TaliZorah

Corrección de erratas: darthdahar (r1.0)

ePub base r1.0



PRÓLOGO

El tiempo pasa—
Les digo contenta a los que sufren—
Sobrevivirán—
Hay un sol—
Aunque ahora no lo crean— (1121)^[1]

«Mamá, ¿qué tiene que ver la idea de Gaia con tu teoría simbiótica?», me preguntó mi hijo Zach, de diecisiete años, después de volver del trabajo un día. Ya no era aspirante a político, sino el desilusionado ayudante de un legislador del gobierno estatal de Boston que acababa de regresar a casa después de un agotador intento de redactar un borrador de ley para residencias de ancianos por encargo de uno de sus dos jefes ausentes.

«Nada —respondí inmediatamente—, o por lo menos, que yo sepa, nada». Desde entonces he estado ponderando su pregunta. El libro que el lector sostiene ahora en sus manos intenta proporcionar la respuesta. Las dos principales ideas científicas en las que he trabajado durante toda mi vida profesional, la teoría de la endosimbiosis serial (SET) y Gaia, y la relación de la una con la otra, forman su tema central.

La pregunta de Zach, cómo encajan la simbiosis y Gaia, fue limpiamente contestada con un chiste por un magnífico antiguo estudiante mío llamado Greg Hinkle que ahora es catedrático de la Universidad de Massachusetts en South Dartmouth. Antes de doctorarse Greg sabía y enseñaba que la simbiosis es simplemente la vida en común y en contacto físico de organismos de especies diferentes. Los socios de la simbiosis —los compañeros simbiontes— moran, tocándose literalmente el uno al otro, o incluso el uno dentro del otro, en el mismo lugar y al mismo tiempo. El

concepto de «Gaia», un viejo nombre griego para la Madre Tierra^[1], postula la idea de que la Tierra está viva. La hipótesis Gaia, propuesta por el químico inglés James E. Lovelock, mantiene que determinados aspectos de los gases atmosféricos y de la superficie de las rocas y del agua están regulados por el crecimiento, la muerte, el metabolismo y otras actividades de los organismos vivos. Greg bromea: «Gaia es simplemente la simbiosis vista desde el espacio»; todos los organismos se tocan, puesto que están bañados por el mismo aire y la misma agua que fluye. Las razones por las que creo que Greg tiene razón serán expuestas con detalle en las siguientes páginas.

Si este libro enseña algo acerca de la simbiosis y la teoría Gaia en el contexto de visiones radicalmente nuevas de la vida será únicamente por la conjunción de cuatro afortunados hechos: primero, la pregunta de Zach; segundo, la contribución de Dorion Sagan a la calidad de mi pensamiento y mi escritura^[2]; tercero, porque Lois Byrnes cuestionó, reorganizó y reestructuró este manuscrito con una preclara honestidad y un delicado gusto artístico^[3]; y en último lugar, por la razonable insistencia de William Frucht, de Basic Books, en una organización más concentrada y una menor dosis de narrativa autoindulgente. El placer de trabajar con un editor con tanta curiosidad intelectual y una capacidad crítica tan adecuada prosigue.

Este libro trata de la vida planetaria, de la evolución planetaria y de cómo está cambiando la imagen que tenemos de ellas. Si hay un trasfondo tiene que ver con la exploración, concretamente con la exploración científica, y con las muchas casualidades y compromisos que pueden nutrirla o bloquearla. Muchas circunstancias conspiran para que los descubrimientos científicos se extingan, especialmente aquellos que causan incomodidad a las sagradas reglas de nuestra cultura. Como especie, nos agarramos a las familiares y reconfortantes conformidades de la corriente principal. Sin embargo, la «convención» penetra más profundamente de lo que tendemos a admitir. Incluso aunque carezcamos de un nombre adecuado para ello y conozcamos la historia de cualquier filosofía específica o estilo de pensamiento, todos nosotros estamos encastrados en nuestra propia y segura «realidad». La manera en la que miramos da forma

a lo que vemos y a cómo sabemos. Cualquier idea que concebimos como un hecho o una verdad está integrada dentro de un estilo completo de pensamiento del que frecuentemente somos inconscientes. Llamemos a las restricciones culturales «incapacidades aprendidas», «pensamientos colectivos» o «construcciones sociales de la realidad», llamemos como llamemos a las inhibiciones dominantes que determinan nuestro punto de vista, nos afectan a todos, incluyendo a los científicos. Todos ellos están cargados con pesados impedimentos a la percepción, ya sean lingüísticos, nacionales, regionales o generacionales. Como las de todos los demás, las asunciones ocultas de los científicos afectan a su comportamiento, restringiendo imperceptiblemente el pensamiento.

Una asunción implícita muy extendida es la de la gran cadena del ser. En ella se define la venerable posición de los humanos como el centro exacto del universo en el medio de la cadena del ser, por debajo de Dios y por encima de las rocas. Esta idea antropocéntrica domina el pensamiento religioso, y también el de aquellos que afirman rechazar la religión y la reemplazan con una visión científica del mundo. Para los griegos la cadena enlazaba a una panoplia de dioses en lo alto con los hombres, las mujeres, los esclavos, los animales y las plantas en orden descendente. Un sustrato de rocas y minerales ocupaba el eslabón más bajo. La versión judeocristiana introducía una ligera modificación: las personas, por encima de los animales, estaban situadas un poco por debajo de los ángeles. El hombre, por supuesto, era obvia e indiscutiblemente superado por el Todopoderoso^[4].

La visión científica del mundo rechaza estas ideas como estupideces obsoletas. Hoy en día todos los seres vivos están igualmente evolucionados. Todos ellos han sobrevivido a tres mil millones de años de evolución desde ancestros bacterianos comunes. No hay seres «superiores», ni «animales inferiores», ni ángeles ni dioses. El diablo, como Santa Claus, es un mito útil. Ni siquiera los primates «superiores» —los monos y los simios— son, a pesar de su nombre (*primate* viene del latín *primas*, «primero»), superiores. Nosotros, los *Homo sapiens sapiens*, y nuestros parientes los primates, no somos entidades tan especiales; más bien somos recién

llegados al escenario evolutivo. Las similitudes de los humanos con otras formas de vida son mucho más impactantes que las diferencias. Nuestra íntima conexión, durante vastos períodos de tiempo geológico, debería inspirar admiración, no repulsión.

Como especie, todavía tememos lo excéntrico en nuestra imagen de nosotros mismos. A pesar de Darwin, o tal vez debido a él, nuestra cultura todavía no entiende realmente la ciencia de la evolución. Cuando la cultura y la ciencia entran en conflicto, siempre gana la cultura. La ciencia evolutiva merece ser comprendida mucho mejor. Sí, desde luego los humanos hemos evolucionado, pero no sólo a partir de los simios o de otros mamíferos; hemos evolucionado a partir de una larga línea de progenitores y, en último término, a partir de la primera bacteria.

La mayor parte de la evolución tuvo lugar en aquellos seres a los que llamamos desdenosamente «microbios». Ahora sabemos que toda la vida evolucionó a partir de las formas de vida más pequeñas, las bacterias; pero nosotros no tenemos por qué alegrarnos. Los microbios, y especialmente las bacterias, son considerados enemigos y denigrados con el nombre de gérmenes. Los microbios, en realidad, son cualquier ser vivo —algas, bacterias, levaduras y demás— que requieren de un microscopio para poder ser observados con precisión. Yo afirmo que los humanos, como el resto de los simios, no son obra de Dios sino de miles de millones de años de interacción entre microbios altamente receptivos y sensibles. Para algunos esta visión es inquietante; para otros, noticias escalofriantes que nos trae la ciencia, una fuente de información desestimable. Yo lo encuentro fascinante: me estimula a aprender más.

1. SIMBIOSIS POR TODAS PARTES

Un Zángano su reluciente Carruaje
Condujo audazmente hasta una Rosa—
Iluminándola y fundiéndose—
Con ella— (1339)^[III]

La simbiosis, el sistema en el cual miembros de especies diferentes viven en contacto físico, es un concepto arcano, un término biológico especializado que nos sorprende. Esto se debe a lo poco conscientes que somos de su abundancia. No son sólo nuestras pestañas e intestinos los que están abarrotados de simbiontes animales y bacterianos; si uno mira en su jardín o en el parque del vecindario los simbiontes quizá no sean obvios pero están omnipresentes. El trébol y la vicia, dos hierbas comunes, tienen bolitas en sus raíces. Son bacterias fijadoras de nitrógeno esenciales para su sano crecimiento en suelos pobres en este elemento. Tomemos después los árboles, el arce, el roble y el nogal americano; entrelazados en sus raíces hay del orden de trescientos hongos simbiontes diferentes: las micorrizas que nosotros podemos observar en forma de setas. O contemplemos un perro, normalmente incapaz de percibirse de los gusanos simbióticos que viven en sus intestinos. Somos simbiontes sobre un planeta simbiótico y, si nos fijamos, podemos encontrar simbiosis por todas partes. El contacto físico es un requisito imprescindible para muchos tipos de vida diferentes.

Prácticamente todas las cuestiones sobre las que trabajo ahora fueron anticipadas por académicos o naturalistas desconocidos. Uno de los más importantes de mis predecesores científicos comprendió y explicó rigurosamente el papel de la simbiosis en la evolución. Ivan E. Wallin (1883-1969), experto en anatomía de la Universidad de Colorado, escribió

un buen libro en el que argumentaba que las nuevas especies se originaban mediante simbiosis. El término evolutivo «simbiogénesis» se refiere al origen de nuevos tejidos, órganos, organismos e incluso especies mediante el establecimiento de simbiosis permanentes de larga duración. Wallin jamás lo utilizó, pero comprendió la idea a la perfección. Él puso especial énfasis en la simbiosis entre animales y bacterias, un proceso al que llamaba «establecimiento de complejos microsimbióticos» o «simbiontismo». Esto es importante. Aunque Darwin tituló su obra más representativa *On the Origin of Species (Sobre el origen de las especies)*, la aparición de nuevas especies fue escasamente discutida en ella^[5].

La simbiosis, y en esto estoy completamente de acuerdo con Wallin, es crucial para la comprensión de la novedad evolutiva y el origen de las especies. De hecho, creo que la propia idea de especie requiere simbiosis. Las bacterias no se dividen en especies^[6]. Ninguna especie existía antes de que las bacterias se fusionaran para formar células más grandes que constituyeron los ancestros de las plantas y de los animales. En este libro explicaré cómo las simbiosis de larga duración condujeron primero a la evolución de células complejas con núcleo y a partir de ahí a otros organismos, como los hongos, las plantas y los animales.

Que las células animales y vegetales se originaron mediante simbiosis ya no es materia de controversia. La biología molecular, incluyendo la secuenciación genética, ha reivindicado este aspecto de mi teoría de la simbiosis celular. La incorporación permanente de bacterias dentro de las células animales y vegetales en forma de plastes y mitocondrias es la parte de mi teoría de la endosimbiosis serial que aparece ahora incluso en los libros de texto de los institutos. Pero el impacto completo de la visión simbiótica de la evolución todavía no se ha sentido; y la idea de que especies nuevas aparecen a partir de fusiones simbióticas entre miembros de las antiguas todavía no ha merecido siquiera discusión por parte de la sociedad científica respetable.

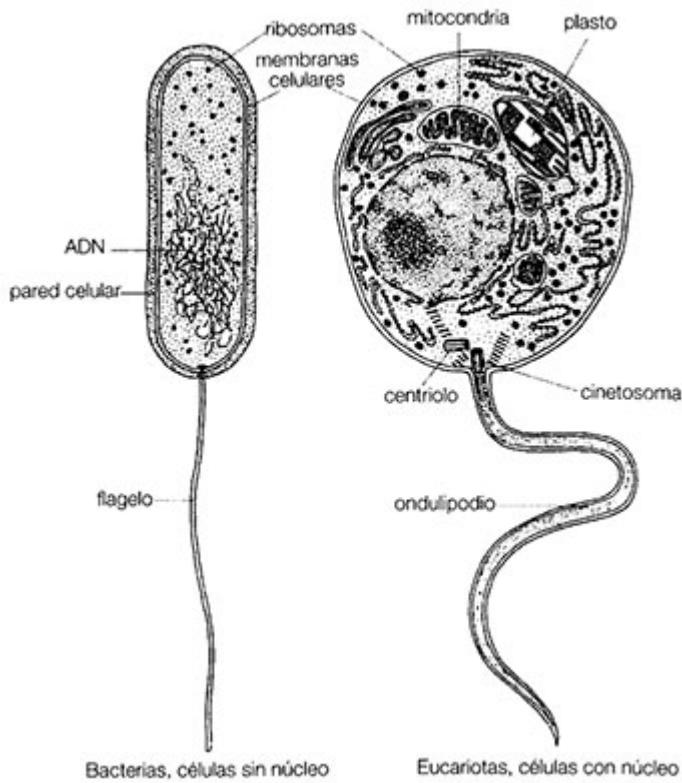


Figura 1. Comparación de las células procarióticas y las eucarióticas.

Aquí tenemos un ejemplo: una vez le pregunté al elocuente y afable paleontólogo Niles Eldredge si sabía de algún caso en el que se hubiera documentado la formación de una nueva especie. Le dije que me conformaría con que su ejemplo hubiera sido extraído del laboratorio, del trabajo de campo o de la observación del registro fósil. Sólo pudo reunir un buen ejemplo: los experimentos de Theodosius Dobzhansky con *Drosophila*, la mosca de la fruta. En este fascinante experimento, poblaciones de mosca de la fruta criaban a temperaturas progresivamente crecientes, separándose genéticamente. Después de cerca de dos años, las criadas con calor ya no podían producir prole fértil con sus hermanas criadas con frío. «Pero —añadió rápidamente Eldredge— ¡esto resultó estar relacionado con un parásito!». De hecho, posteriormente se descubrió que las moscas que criaban en caliente carecían de una bacteria simbiótica intracelular que aparecía en las que lo hacían en frío. ¡Eldredge descartó este caso como una observación de especiación porque implicaba una

simbiosis microbiana! Le habían enseñado, como a todos nosotros, que los microbios son gérmenes y que cuando tienes gérmenes sufres una enfermedad, no te conviertes en una nueva especie. También le habían enseñado que la evolución mediante selección natural tiene lugar por la acumulación gradual, a lo largo de eones, de mutaciones genéticas simples.

Irónicamente, Niles Eldredge es autor, junto con Stephen Jay Gould, de la teoría del «equilibrio puntuado». Eldredge y Gould mantienen que el registro fósil muestra que la evolución permanece estática la mayor parte del tiempo y que actúa súbitamente: durante breves lapsos de tiempo tienen lugar cambios rápidos en el registro fósil; después la estasis prevalece durante largos períodos. Desde el punto de vista del tiempo geológico, las simbiosis son como el destello de relámpagos evolutivos. Para mí la simbiosis, como fuente de novedad evolutiva, ayuda a explicar la observación del «equilibrio puntuado» de las discontinuidades del registro fósil.

Los únicos organismos, además de la mosca de la fruta, en los cuales se ha visto cómo se originaban especies en el laboratorio son los miembros del género *Amoeba* y también en este caso estaba implicada la simbiosis. La simbiosis es una clase de lamarckianismo, aunque no el de peor fama. El lamarckianismo, que recibe su nombre de Jean Baptiste Lamarck —según los franceses, el primer evolucionista—, es rechazado con frecuencia como «la herencia de caracteres adquiridos». En el lamarckianismo simple los organismos heredan características inducidas en sus padres por condiciones medioambientales, mientras que mediante simbiogénesis los organismos no adquieren características sino organismos diferentes y completos y, evidentemente, ¡sus conjuntos completos de genes! Yo podría decir, como lo han hecho con frecuencia mis colegas franceses, que la simbiogénesis es una forma de neolamarckianismo. La simbiogénesis es el cambio evolutivo mediante la herencia de conjuntos de genes adquiridos^[7].

Los seres vivos desafían a una definición precisa. Luchan, se alimentan, danzan, se aparean y mueren. En la base de la creatividad de todas las formas de vida familiares de gran tamaño, la simbiosis genera novedad. Reúne diferentes formas de vida, siempre por alguna razón. Con frecuencia,

el hambre une al depredador con la presa, o a la boca con la bacteria fotosintética o la víctima algal. La simbiogénesis reúne a individuos diferentes para crear entidades más grandes y complejas. Las formas de vida simbiogenéticas son incluso más improbables que sus inverosímiles «progenitores». Los «individuos» permanentemente se fusionan y regulan su reproducción. Generan nuevas poblaciones que se convierten en individuos simbióticos multiunitarios nuevos, los cuales se convierten en «nuevos individuos» en niveles más amplios e inclusivos de integración. La simbiosis no es un fenómeno marginal o raro. Es natural y común. Habitamos un mundo simbiótico.

En Bretaña, en la costa nordoccidental de Francia, y a lo largo de las playas que bordean el canal de la Mancha, se encuentra una extraña clase de «alga marina» que no es en absoluto un alga marina. Desde lejos parece una mancha verde brillante sobre la arena. Las manchas se mueven ligeramente, haciendo relucir los charcos poco profundos. Cuando tomas un poco de esta agua verde y la dejas deslizarse entre los dedos puedes observar cintas viscosas muy parecidas a las algas. Una pequeña lupa de mano o un microscopio de bajo aumento revela que lo que parecían algas son en realidad gusanos verdes. A diferencia de las algas, estas masas verdes de gusanos que toman el sol excavan en la arena y desaparecen eficazmente. Estos animales fueron descritos por primera vez en los años veinte por un inglés, J. Keeble, que pasaba sus veranos en Roscoff. Keeble los llamó «animales-planta» e hizo un espléndido diagrama de ellos en la cubierta de su libro *Plant-Animals*. Los platelmintos de la especie *Convoluta roscoffensis* son verdes porque sus tejidos están plagados de células de *Platymonas*; y puesto que son translúcidos, el color verde del alga fotosintética *Platymonas* se observa a través de ellos. Aunque son preciosas, estas algas verdes no son meramente decorativas: viven y crecen, mueren y se reproducen dentro del cuerpo de los gusanos. De hecho, ellas producen el alimento que «comen» sus anfitriones. La boca del gusano termina siendo superflua y deja de funcionar cuando las larvas salen del huevo. Las algas simbióticas, en el interior de sus invernaderos móviles, reciben la luz del sol que les permite crecer y alimentarse mientras destilan productos

fotosintéticos y alimentan a sus anfitriones desde dentro. Incluso le hacen al gusano el favor de gestionar sus desperdicios: reciclan el residuo de ácido úrico del animal convirtiéndolo en nutrientes para ellas. El alga y el gusano constituyen un ecosistema en miniatura que nada bajo el sol. De hecho, estos dos seres tienen una relación tan íntima que es difícil, sin un microscopio muy potente, decir dónde termina el animal y dónde empieza el alga.

Tales asociaciones abundan. Los cuerpos de los caracoles *Plachobranchus* albergan simbiontes verdes que crecen formando unas filas tan perfectas que parece que hubieran sido plantados. Los bivalvos gigantes funcionan como jardines vivientes, colocando sus cuerpos de manera que expongan las algas hacia la luz. *Mastigias* es un medusoide del tipo carabela portuguesa que nada en el océano Pacífico. Como miríadas de pequeños parásoles verdes, los medusoides *Mastigias*^[8] flotan a miles entre los rayos de luz cerca de la superficie del agua.

De forma parecida, las hidras tentaculadas de agua dulce pueden ser blancas o verdes dependiendo de si sus cuerpos están abarrotados o no de socios fotosintéticos verdes. ¿Son las hidras animales o plantas? Cuando una hidra verde está habitada permanentemente por sus socios productores de alimento (llamados *Chlorella*), es difícil decirlo. Las hidras, si son verdes, son simbiontes. Son capaces de fotosintetizar, de nadar, de moverse o de quedarse fijas. Han permanecido en el juego de la vida porque se convirtieron en individuos por incorporación.

Nosotros los animales, los treinta millones de especies que somos, emanamos del microcosmos. El mundo microbiano, la fuente y manantial del suelo y el aire, conforma nuestra propia supervivencia. Un tema importante en el drama microbiano es la emergencia de la individualidad a partir de la interacción comunitaria de actores que una vez fueron independientes.

Me encanta contemplar la lucha diaria de nuestros colegas planetarios no humanos. Durante muchos años Lorraine Olendzenski, una antigua alumna que ahora trabaja en la Universidad de Connecticut, y yo grabamos en vídeo la vida en el microcosmos. Recientemente hemos trabajado con

Lois Burnes, la vivaz ex directora asociada del New England Science Center de Worcester, Massachusetts. Juntas, y con un excelente grupo de estudiantes de la Universidad de Massachusetts, hacemos películas y vídeos para presentar a la gente a nuestros conocidos microbianos.

Ophrydium, un verdín de agua estancada que tras una inspección detenida parece estar hecho de cuerpos contables con forma de bola de gelatina verde, es un ejemplo de individualidad emergente que descubrimos y redescrivimos recientemente en Massachusetts. Nuestras películas muestran estas bolas acuáticas con exquisita claridad. La bola de gelatina verde «individual» y más grande está compuesta por «individuos» más pequeños con forma de cono que se contraen activamente. Éstos, a su vez, están compuestos: *Chlorellas* verdes moran dentro de los ciliados, todas apelotonadas formando filas. Dentro de cada cono invertido hay cientos de simbiontes esféricos, células de *Chlorella*. *Chlorella* es un alga verde común; las de *Ophrydium* fueron capturadas para prestar servicio a la comunidad de la bola de gelatina. Cada «organismo individual» de esta «especie» es en realidad un grupo, un paquete de microbios limitado por una membrana que parece un único individuo y actúa como tal.

El kefir, una nutritiva bebida consumida en las montañas del Cáucaso, es también un complejo simbiótico. El kefir contiene coágulos granulados que los georgianos llaman «píldoras de Mahoma». El coágulo es un paquete integrado por más de veinticinco tipos diferentes de levaduras y bacterias. Cada uno de ellos está constituido por millones de individuos. De tales cuerpos interactivos de organismos fusionados a veces surgen nuevos seres. La vida «independiente» tiende a juntarse y a resurgir como un nuevo todo en un nivel superior y más amplio de organización. Sospecho que el futuro cercano de *Homo sapiens* como especie requiere nuestra reorientación hacia las fusiones y uniones con los colegas planetarios que nos han precedido en el microcosmos. Una de mis ambiciones es convencer a algún gran director para que produzca una visión de la historia evolutiva en forma de imagen microcósmica en IMAX u OMNIMAX, mostrando las espectaculares relaciones vivientes mientras se forman y se disuelven.

Ahora y a lo largo de la historia de la Tierra, las simbiosis, ya fueran estables o efímeras, han prevalecido. Los relatos sobre este tipo de evolución merecen ser contados.

2. CONTRA LA ORTODOXIA

Las colinas levantan sus Cabezas de Púrpura
Y los Ríos se inclinan a mirar
Mas el Hombre no siente hacia esta Multitud
Curiosidad alguna (1688)^[III]

No puedo recordar ningún dolor emocional más agudo que el que sentí cuando tenía trece años. Ninguna decepción romántica o profesional me ha hundido tanto en la tristeza y en la inactividad. En secreto ejercicio de los derechos que yo consideraba que ostentaba como persona de libre voluntad, me escabullí del octavo curso de la Escuela Laboratorio de la Universidad de Chicago^[9], con su oferta infinitamente menor de novios potenciales, y regresé al enorme instituto público al que yo había decidido que pertenecía. Me negué a permanecer ni un solo día más en aquella escuela laboratorio, donde todo era tan familiar y el álgebra tan dura.

Por entonces vivía en el agradable apartamento de mis padres de la avenida South Shore y decidí que escaparme de casa era la única solución. Evidentemente, no tenía dinero ni ningún sitio adonde ir, pero sí un rígido horario de clases y de obligaciones. Cuando la imposibilidad de escapar resultó evidente y los días se hacían cada vez más largos y más agudamente fríos, tramé un plan. Habiendo ingresado en la Escuela Laboratorio de la Universidad de Chicago en cuarto grado en el curso que comienza en septiembre (el único que tenían) sabía por supuesto que iba un semestre retrasada. Mis amigos del instituto público me llevaban medio año de ventaja. Mi tristeza creció en noviembre y diciembre, a medida que el primer semestre de octavo grado iba llegando a su conclusión, y mi plan se hizo más firme. Abandonaría para siempre las complicaciones del álgebra y

me enrolaría, con mis viejos amigos del colegio público, en el noveno grado del instituto Hyde Park, que contaba con un grueso de cinco mil estudiantes. Después de una aburrida sesión en la que mi padre me dejó extraordinariamente claro que no haría tal cosa, me di cuenta de que mi plan tendría que funcionar en la clandestinidad. Un bonito día de sol mortecino a principios de febrero, con un glorioso sentimiento de liberación de las ataduras de la responsabilidad, hice novillos. Tomé un autobús y encontré la enorme y anónima oficina del confuso y policializado instituto urbano de la calle Sesenta y tres. Me matriculé en noveno grado, curso escolar para el que me sentía altamente cualificada, y cuando el personal de la escuela me preguntó, dije que había asistido a la Universidad de Chicago pero que, después de perderme el semestre de otoño, había regresado recientemente a la ciudad con mis padres.

Durante cerca de doce semanas simplemente me dediqué a asistir a todas las clases que me correspondían. Disfruté en especial de las clases de la señora Kniazza, una extraordinaria profesora de español. Me comporté como una estudiante modelo. Mis padres, por supuesto, no tenían razón alguna para pensar que no iba todos los días a la Escuela Laboratorio de la Universidad de Chicago y yo no encontré razón alguna para desengañarles. Pasado algún tiempo, en primavera, recibí una notificación. El instituto Hyde Park había sido informado, al pedir una copia de mi expediente académico escolar, de que yo no había terminado el octavo grado en la Universidad de Chicago. Determinaron que no tenía ningún derecho a asistir al Hyde Park y me llamaron a la oficina del director para interrogarme. No, no había terminado el curso en la Universidad de Chicago, pero ¿para qué habría de molestarme en hacerlo?, afirmé. Desde preescolar en el colegio O'Keefe había empezado el curso en febrero y ahora había recuperado a mis viejos amigos del O'Keefe, que actualmente asistían al instituto Hyde Park. Al reunirme con mis antiguos compañeros de clase, sencillamente estaba volviendo al *status quo ante*. La furia se desbordó cuando la administración del instituto cayó en la cuenta de que mis padres no tenían ni idea de que yo no estaba en la Escuela Laboratorio; cuando me di de baja allí no admití que mis padres no lo sabían. Por

supuesto, mis padres no se habían dado cuenta de que no recibían la factura por las clases.

Muchas sesiones de lloros siguieron dentro y fuera del colegio. No recuerdo si fue mi padre o fui yo quien dio con la solución. Se nos ocurrió mientras nos preguntábamos cómo son colocados correctamente en la educación secundaria norteamericana los adolescentes de colegios extranjeros que tienen sistemas de evaluación distintos. Pedimos que me sometieran a exámenes de matemáticas, lengua, historia y humanidades para estudiantes extranjeros de instituto y pasé con facilidad al noveno grado. Gané la batalla. Me permitieron completar el curso en el Hyde Park, donde disfrutaba de una oferta de novios mucho más amplia.

Pero perdí la guerra. Después de dos años en el instituto público, cuando volví a ingresar en la Universidad de Chicago como estudiante universitaria «precoz», mis asesores académicos me dijeron que había disminuido mi destreza para las matemáticas, que mi vocabulario había empeorado y que, en general, era peor estudiante al final del décimo grado que cuando estaba a mitad del octavo. Cuando en la primavera de 1954 dejé finalmente la miseria racial urbana de Hyde Park para asistir a La Facultad (como llamaban a la Universidad de Chicago, incluso aunque aceptaran estudiantes de muy temprana edad) estaba preparada, después de un lapso de dos años, para ser de nuevo una buena estudiante. Otra vez en el sitio al cual pertenecía, según mis angustiados padres, estaba lista para encontrarme con lo más selecto, lo más atractivo, lo más inteligente y lo más cotizado de entre los hombres jóvenes. A continuación vinieron los años Sagan.

A los dieciséis años fui muy afortunada al ser aceptada en el programa especial de adelantados de la Universidad de Chicago. Y aunque tres años y medio después me gradué con muchos méritos y adquisiciones, incluyendo un título en artes liberales y un marido, con diferencia el más duradero de ellos fue un persistente y finamente alimentado escepticismo crítico. Valoró la educación que recibí en la Universidad de Chicago por su enseñanza central: uno debe esforzarse siempre para distinguir lo auténtico de las bobadas.

Mi compañero, el astrónomo en ciernes Carl Sagan, estaba casi cinco cursos por encima de mí. Alto, guapo, con una mata de pelo castaño oscuro y excesivamente hablador, estaba ya entonces lleno de ideas. Un día, corrí literalmente hacia él mientras subía por las escaleras de Eckhart Hall, el edificio de matemáticas. El Sagan de diecinueve años de entonces estaba listo para propulsar su astronómica carrera. Él era un estudiante de doctorado en físicas, y yo sólo una niña nerviosa, entusiasta e ignorante.

Yo era una analfabeta científica y Carl y su verborrea me fascinaban. Ya en ese momento parecía ser un consumado profesional. Desde nuestro primer encuentro compartió conmigo, y con cualquiera que le escuchara, su preclara comprensión de la vastedad del tiempo y el espacio. Como presidente del club de astronomía, periodista con obras publicadas y orador público, mostraba a cualquiera que estuviese a su alrededor cómo nosotros, ignorantes pollitos, podríamos enrolarnos enérgicamente en la iniciativa científica. Su amor por la ciencia era contagioso.

Sin embargo, nuestra apasionada incursión en el terreno amoroso tuvo un accidentado comienzo y un igualmente abrasivo final. Mi padre odiaba su arrogancia y mi madre desconfió siempre de su carácter egocéntrico. Viajamos hacia el sur, a México, y hacia el este, a Nueva Jersey. Fuimos juntos a muchos sitios y rompimos varias veces. Incluso me grabé a mí misma en una cinta magnetofónica enumerando las razones por las que casarme con él sería una jugada estúpida y autodestructiva. Aun así, el 6 de junio de 1957, cuando yo tenía diecinueve años, celebramos una maravillosa boda. Mi madre, la maestra de la elegancia, había elegido sólo lo mejor. Su madre, Rachel Sagan, aunque evidentemente estuvo presente a lo largo del festejo, ese día me envió un telegrama que decía: «De licenciada a esposa en sólo una semana». La ceremonia de graduación de mi flamante Legado Robert M. Hutchins, el título —no optativo ni principal — en artes liberales de la Universidad de Chicago, había tenido lugar una semana antes de nuestra boda. Hutchins (1899-1977), introductor de las artes liberales en la educación superior, ascendió a la presidencia de la Universidad de Chicago a los treinta años y permaneció en ella veintidós

años más. Aunque yo llegué cuando él ya había emigrado al oeste, debo mi educación a su ingenio y a su currículo reformado.

Convencida, en parte por Carl, de que el fenómeno de la herencia se reduciría finalmente a una única explicación química, yo pensaba que la ciencia de la genética nos daría la mejor pista de cómo funciona la evolución. A los diecinueve años seguí sin saberlo la senda que George Gaylord Simpson había abierto^[10]. Simpson escribió que la evolución no era la materia más importante porque él la estudiara, sino más bien que él estudiaba la evolución porque era la ciencia más importante.

Ese septiembre, justo unos días antes del lanzamiento del satélite soviético *Sputnik*, acompañé a Carl al Observatorio Yerkes, en Williams Bay, Wisconsin. Yerkes, el departamento de astronomía de la Universidad de Chicago, estaba situado a casi ciento cincuenta kilómetros de la gran ciudad sobre el lago. Carl trabajaba allí como becario predoctoral, uno de los únicos cuatro en ciencias planetarias (una disciplina casi desconocida por aquella época). Ya entonces había comenzado su búsqueda de planetas que la vida pudiera habitar.

Yo también presenté la solicitud para ingresar en un programa de becarios. Sorprendida de que aceptaran mi graduado no principal en filosofía y artes liberales como una licenciatura real, me convertí en alumna del máster ciento cincuenta kilómetros al noroeste, en la Universidad de Wisconsin, en Madison. A partir de 1958, embarazada y somnolienta en clase, estudié biología celular y genética en dos departamentos. Empecé como profesora ayudante allí donde más se me necesitaba, en el departamento de zoología de la facultad de artes liberales. Mi otro trabajo era en el departamento de genética de la facultad de agricultura. Aprendí genética general y después genética de poblaciones de mi profesor del máster, James F. Crow. Yo adoraba el curso de genética general de Crow; cambió mi vida. Cuando dejé la Universidad de Chicago sabía que quería estudiar genética, pero después de las clases de Crow supe que sólo quería estudiar genética. Imaginaba que el estudio de la genética era la manera adecuada para reconstruir la evolución, el relato de la vida temprana y no humana sobre la Tierra. Cuando mi hijo pequeño Dorion y yo estábamos

escribiendo nuestro libro *Microcosmos* recuerdo haber ido a petición suya a la estación del Boston MBTA Auditorium de la avenida Massachusetts para ver un graffiti garabateado sobre un plano de orientación en el túnel del metro. Las grandes letras negras preguntaban: «¿Cuándo aparecieron las amebas en el caos?». Me reí a carcajadas al ver mi enfoque, en esencia mi pregunta vital, plasmada sobre las oscuras paredes de una lúgubre estación de metro suburbano.

Todavía me planteo los comienzos del pasado remoto. ¿Qué le habría ocurrido a la vida sobre la Tierra en los primeros tiempos? Después de aquel primer curso sentí que el campo de la genética de poblaciones, con su insistencia en conceptos neodarwinistas demasiado abstractos, tales como «carga mutacional», «aptitud» y «coeficientes de selección», enseñaba más una religión que una descripción de las reglas por las cuales los organismos reales transmitieron sus genes y evolucionaron.

Los genes, como todo el mundo sabía por entonces, estaban concentrados en el núcleo de cada célula animal y vegetal, desde donde eran transmitidos a la prole, normalmente inalterados. Mediante conjuntos detallados de problemas y soberbias conferencias de Crow aprendimos fácilmente que estos genes determinaban, de hecho controlaban, los rasgos de los descendientes.

Por mi naturaleza sentía tan poca inclinación a concentrarme monomaniáticamente en el núcleo de la célula como a ser una esposa satélite en una familia nuclear; mis atenciones, como las de muchas mujeres, estaban divididas. Mi amiga Mary Catherine Bateson describe a las mujeres modernas como «visionarias periféricas». Una mujer debe ser casi octópoda en sus atenciones si quiere sobrevivir. Sosteniendo un bebé con un brazo, señala Bateson, remueve un cazo con el otro mientras vigila a un niño que acaba de empezar a andar. Estas múltiples presiones no las hacían desaparecer entonces, ni lo hacen ahora, la voluntad política o la retórica feminista.

Mi trabajo empezó descentrado. Estudié los sistemas genéticos que otros tendían a ignorar, aquellos que residían en estructuras celulares fuera del núcleo (orgánulos). La información sobre los «genes citoplásmicos» me

fascinó desde el momento en que tuve conocimiento de ella por primera vez. El citoplasma es la porción líquida de la célula, en la que se encuentran las mitocondrias, los cloroplastos y otros orgánulos^[11]. Entonces, y ahora, se suponía que los genes estaban centralizados en el núcleo. Puesto que los genes citoplásmicos eran confusos, a menudo los experimentos que establecían su existencia eran incompletos. Yo no fui la primera en fijarme en ellos. En realidad, muchos trabajadores tempranos de la genética celular, o «herencia citoplásrica» —como también se conocía en aquella época—, eran conscientes de su existencia. Jan Sapp, en la actualidad catedrático de la Universidad de York, cerca de Toronto, describe maravillosamente en su *Evolution by Association (Evolución por asociación)* la historia intelectual de este completo subcampo de la genética^[12]. La investigación en genética citoplásrica comenzó en la primera década del siglo xx, al mismo tiempo que el trabajo en genética nuclear. Ambas líneas de investigación partieron del redescubrimiento del trabajo de Gregor Mendel, que tan sólo estableció los genes nucleares. Mendel, el monje jardinero de Bohemia, infirió la existencia de genes —a los que llamó «factores»— a partir de las reglas de la herencia de características alternas en los guisantes. Su trabajo de 1860 fue redescubierto por tres científicos diferentes en 1900, mucho tiempo después de su muerte; de ahí que se le aplauda y se le considere popularmente el «padre de la genética». Los investigadores en genética, eufóricos por sus tempranos descubrimientos de los factores nucleares de Mendel (que se convirtieron en los genes nucleares), mostraron su perplejidad ante los sistemas genéticos no nucleares (o citoplásicos). Boris Ephrussi, experto en genética de levaduras y emigrante ruso que vivía en Francia, bromeaba diciendo que había «dos tipos de sistemas genéticos: los nucleares y los no-claros^[13]». Evidentemente, con «no-claros» quería decir citoplásicos^[14].

Lo que empezó en los márgenes de la visión microscópica de la célula ahora se ha acercado más al escenario central. El descubrimiento de la importancia de la simbiosis en la evolución nos ha forzado a revisar la anterior visión nucleocéntrica de la evolución como una lucha sangrienta entre animales. La creencia de que la naturaleza tiene «los dientes y las

garras ensangrentados» y permanece indolente e indiferente ante el sufrimiento individual no excluye el hecho de que la simbiosis, al principio una incómoda alianza entre formas de vida distintas, pueda subyacer al origen de la novedad evolutiva fundamental. La conciencia humana y la del resto de los animales, así como otros tipos de belleza y complejidad biológicas, son propiedades de nuestra puntillista y coevolutiva ascendencia bacteriana. El «intervivir» celular, una infiltración y asimilación mucho más profunda que cualquier aspecto de la sexualidad humana, produjo todas las cosas, desde los brotes florecidos en primavera y los cuerpos mamíferos húmedos y calientes, al nexo global de la Tierra. Tres décadas más tarde, la simbiogénesis está transformando la genética citoplásmica, anteriormente marginal, en una materia fundamental para los estudios genéticos.

El abad Mendel postuló la existencia de «factores»; sólo después otros los llamaron genes nucleares. Estos factores sobre los que teorizó Mendel producían diferentes colores (amarillo y verde) y texturas (liso o rugoso) en los guisantes dulces que cultivaba y cruzaba en su huerto del monasterio. Es muy probable que el propósito de Mendel fuera mostrar la inmutabilidad última de la herencia y de esta manera, erigiéndose en una venerable y brillante versión del «científico creador» moderno y oximorónico, refutar la idea «adanicida» de Charles Darwin de la mutabilidad de todas las especies. De acuerdo con el brillante manuscrito inédito de una historiadora de la ciencia aficionada de la isla de Nassau (Bahamas), cuyo nombre no puedo recordar, Mendel no encontró evidencia alguna de que las especies cambiaran y evolucionaran. Las flores masculinas rojas y las femeninas blancas producían semillas que crecían dando una prole rosa. Pero las flores generadas por progenitores rosas eran igual de rojas o blancas que sus abuelos. Cualquiera que fuera su motivación, los factores de Mendel estaban correlacionados con la herencia de características inalteradas. Es más, estos hipotéticos factores estaban estrictamente asociados al comportamiento de los cromosomas que se tiñen de rojo y que están encerrados dentro de la membrana nuclear. Mi colega Jan Sapp ha publicado un análisis del trabajo de Mendel similar al de la mujer

desconocida que tímidamente llegó a mi oficina con fajos de papeles, evidencia de años de trabajo que jamás verían la luz.

Los cromosomas, diminutos cuerpos que residen dentro del núcleo de las células animales y vegetales, eran conocidos mucho antes del descubrimiento de la estructura del ácido desoxirribonucleico (ADN) en 1953. Por la época en la que alcancé la mayoría de edad científica, la teoría cromosómica de la herencia ya había sido canonizada como la verdad. El calificativo de «teoría» se desecharon y se enseñaba como si de un hecho se tratara: los genes estaban «sobre los cromosomas». Las pruebas mostraban inequívocamente que, metidos dentro del núcleo de las células tisulares, los hipotéticos genes estaban en los cromosomas. Estos genes se correspondían exactamente con los factores teóricos de Mendel: seguían las reglas del juego y determinaban si había flores rojas, blancas o rosas en las plantas y otras características heredadas comparables en los animales. Las pruebas del emplazamiento nuclear de los genes que determinaban los rasgos se consideraban lo suficientemente robustas como para que los recién obtenidos conocimientos científicos pudieran ser resumidos como «las bases cromosómicas de la herencia».

Desde mediados de la década de los cincuenta, los biólogos de la corriente dominante, o «bioquímicos y citólogos biofísicos», como se conocían, encontraron un considerable estímulo en la búsqueda de la «base material» concreta, la materia real que constituía los factores de Mendel. ¿De qué estaban compuestos los cromosomas que se teñían de rojo? ¿Cuál era la química de la herencia? En aquella época la propia ciencia, como en alguna novela gótica o de ciencia ficción, estaba desentrañando el secreto de la vida; la excitación faustiana de una búsqueda tal difícilmente puede pasarse por alto. Con salidas falsas, pero con espectaculares éxitos finales, la comprensión de las entrañas de la célula y de su núcleo creció. La química subyacente a la célula incesantemente activa fue revelada. A partir de moléculas de nutrientes se sintetizaban las proteínas y se replicaba el ácido nucleico. Estas actividades químicas eran la base del metabolismo de toda vida.

Pero un óvulo no es una bolsa nucleada llena de genes. Como señalaban insistentemente los embriólogos y los botánicos, los genes o factores citoplásmicos de las células óvulo tanto vegetales como animales, aunque no están dentro del núcleo, también ejercen control sobre los rasgos. Se descubrió que los factores externos al núcleo estaban profundamente implicados en la respiración del oxígeno y la coloración de las hojas.

Los genes, en otras palabras, no están necesariamente en el núcleo. Tanto en las plantas como en los animales algunos factores genéticos celulares están dispersos. Desde los años treinta, momento en el que se llevó a cabo cierto trabajo bioquímico temprano en Alemania e Inglaterra, se había establecido firmemente en las levaduras y en otros hongos que las mitocondrias contenían sus propios genes. Estos pequeños orgánulos son el lugar donde el oxígeno del aire reacciona con moléculas de alimento para producir energía química. Las células vegetales y algales verdes contienen llamativos cuerpos verdes, los cloroplastos, dentro de los cuales tiene lugar la fotosíntesis que convierte la luz del sol en energía química utilizable y en alimento. También los cloroplastos tienen sus propios genes. Esto fue descubierto a comienzos de siglo por H. De Vries y C. Correns, dos botánicos que redescubrieron independientemente los genes de Mendel. El cloroplasto, heredado de sólo un progenitor, normalmente el femenino, aparentemente determinaba el verdor. El modelo de herencia era no nuclear.

«Desde el punto de vista de la herencia, el citoplasma de una célula puede ser tranquilamente ignorado». Incluso cuando leí esta afirmación por primera vez, expresada con confianza por T. H. Morgan, catedrático de Columbia y persona clave en la fundación de la genética en 1945, la consideré una arrogante simplificación^[15]. La herencia celular, tanto la nuclear como la citoplásmica, siempre se debe tener en cuenta en lo que respecta a la célula completa, al organismo completo.

Aunque Carl desempeñó un papel importante en mi adolescente conversión científica, «La Facultad» de la Universidad de Chicago fue probablemente todavía más crucial. Ciencias Naturales II, una asignatura anual, supuso un primer paso crítico en mi educación científica. En lugar de libros de texto, los estudiantes de las clases de biología de CCNN II leíamos

los propios escritos de los grandes científicos: Charles Darwin; Gregor Mendel; el biólogo alemán Hans Spemann, un embriólogo en activo durante las dos primeras décadas del siglo xx, y August Weismann, los cuales descubrieron conjuntamente la fertilización y postularon «la continuidad del plasma germinal». También leíamos a neodarwinistas anglófonos, incluyendo a los matemáticos y genetistas británicos G. S. Hardy, J. B. S. Haldane y R. A. Fisher. Hardy, Haldane, Fisher y muchos otros desarrollaron los principios matemáticos de la genética de poblaciones, un pilar crucial que mantiene en lo alto al neodarwinismo. CCNN II nos proporcionó la inspiración para considerar la genética de poblaciones, la embriología y muchos otros conceptos: ¿Qué es la herencia? ¿Qué une a las generaciones? ¿Cómo inspiran el desarrollo de un animal completo los materiales de un óvulo y un espermatozoide fusionados? Como aprendimos en CCNN II, la ciencia es un arte liberal, una forma de llegar a saber. Nos enseñaron cómo, a través de ella, podríamos ir por ahí planteando importantes cuestiones filosóficas. Los asuntos de la herencia profunda, que al principio de CCNN II me consumían, me han inspirado hasta el día de hoy.

La extraordinaria ciencia de la Universidad de Chicago, un conjunto de métodos honestos, abiertos, accesibles y enérgicos, apenas existe en la actual mentalidad, obsesionada con la tecnología. Allí la ciencia facilitaba el planteamiento de las cuestiones profundas en las que la filosofía y la ciencia se unen: ¿Qué somos? ¿De qué estamos hechos nosotros y el universo? ¿De dónde venimos? ¿Cómo funcionamos? No dudo de que debo la elección de una carrera científica a la genialidad de esta educación «idiosincrásica».

Leyendo el programa de CCNN II, escuché las voces de los grandes biólogos en mi mente: Vance Tartar diseccionando al «ciliado gigante» *Stentor*; Thomas Hunt Morgan estableciendo la supremacía del núcleo; Hermann J. Muller definiendo la vida como «la mutación, la reproducción y la reproducción de la mutación»; Theodosius Dobzhansky cazando moscas de la fruta en su interminable lucha por correlacionar genes, cromosomas,

medio ambiente e historia evolutiva. El fumador de pipa A. H. Sturtevant, en el laboratorio de moscas de la Universidad de Columbia, buscaba las bases cromosómicas de los factores que determinaban las características de tipos distintos de mosca de la fruta. La genética y la evolución, los genetistas y los evolucionistas, incluso aquellos que llevan mucho tiempo muertos, me fascinaron desde mi primer encuentro con su trabajo. El cuerpo de ciencia coherente producida por la escuela norteamericana de genetistas en la primera mitad del siglo xx me proporcionó un sentido histórico del pensamiento biológico, especialmente del genético. Desde el comienzo la necesidad de una explicación química era evidente.

Mi fascinación con la evolución comenzó en CCNN II. Theodosius Dobzhansky, todavía en activo en la Universidad de Columbia cuando leí su trabajo por primera vez, escribió que «nada en biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución»^[16]. La evolución, definida simplemente como el cambio a través del tiempo, trae a escena la intrincada historia de la cual somos el legado vivo. El estudio de la evolución es lo suficientemente vasto como para incluir el cosmos y sus estrellas y también la vida, incluyendo la vida humana y nuestros cuerpos y nuestra tecnología. La evolución constituye sencillamente *toda* la historia.

Incluso antes de graduarme sentía que había algo demasiado fácil, demasiado reduccionista, demasiado limitante en la idea de que los genes del núcleo determinan todas las características de las plantas o de los animales. ¿Cómo pudieron conducir a la evolución de los ojos y de las flores mutaciones al azar de genes? Mi escepticismo se confirmó cuando, siguiendo a Carl a Wisconsin, continué mi trabajo biológico en Madison. Como prefería mirar directamente a las células vivas en vez de machacarlas para examinar su química intrínseca (metabolismo), empezaron a intrigarme los cromosomas y otros orgánulos heredados, cuerpos visibles dentro de la célula. Me dediqué por completo a la búsqueda de las reglas de su transmisión.

Hacia el año 1963, muchos artículos sobre los factores citoplásmicos de los óvulos mostraban misteriosos genes fuera del núcleo. Las plantas femeninas verdes cruzadas con pies masculinos blancos a veces dan lugar a

prole exclusivamente verde. Sin embargo, en esas mismas especies, si los pies masculinos verdes son cruzados con pies femeninos blancos, sólo crece prole blanca de las semillas. ¿Por qué? En la herencia de los genes nucleares las contribuciones masculinas y femeninas son iguales y no importa de qué sexo es el progenitor. Para mí, como para mis predecesores en la genética cuyos trabajos había leído, era evidente que el óvulo o la célula vegetal no son simplemente una bolsa que contiene el núcleo con sus sumamente importantes genes. El consejo de T. H. Morgan de ignorar el citoplasma me parecía, incluso entonces, simple negación.

La conciencia de que el énfasis en la conexión de la genética con la química había dado innecesariamente a los científicos una perspectiva muy estrecha, centrada solamente en el núcleo, fue mi punto de partida. Estudié el trabajo de Ruth Sager y Francis Ryan sobre genes citoplásmicos y los extraños casos genéticos de mohos recopilados por el investigador italiano Gino Pontecorvo^[17]. Los experimentos descritos por estos autores mostraban que dos tipos de orgánulos —estructuras limitadas por una membrana dentro de la célula pero fuera del núcleo—, los plastos y las mitocondrias, habían afectado de forma significativa a la herencia. Las referencias que aparecían en estos libros me llevaron a *The Cell in Development and Heredity* (*La célula en el desarrollo y la herencia*), la obra maestra de 1928 escrita por E. B. Wilson^[18]. Wilson recopiló libros tempranos que hablaban de la similitud entre los orgánulos celulares, los plastos y las mitocondrias, y los microbios de vida libre. Esta pista me condujo al estudio de los microbios en la literatura sobre simbiosis. A medida que me di cuenta de la abundancia de encuentros simbióticos en la naturaleza, especialmente bacterias viviendo junto a, y en ocasiones dentro de, las células de insectos o gusanos, empezaron a intrigarme los tempranos investigadores a los cuales Wilson hacía referencia: I. E. Wallin, K. S. Merezhkovsky y A. S. Famintsyn. El relato aparece en el soberbio libro de Khakhina, ahora traducido al inglés^[19]. Sospechaba que estaban en lo cierto cuando planteaban la hipótesis de que las partes no nucleares de la célula, con su propia herencia peculiar, eran formas remanentes de bacterias que una vez vivieron en libertad. Me parecía obvio que había sistemas de

herencia dobles con células dentro de células. Más tarde descubrí que la idea también había sido obvia para Merezhkovsky.

Ingresé como estudiante de doctorado en el departamento de genética de la Universidad de California en Berkeley en 1960. Aunque tenía veintidós años y ya era madre de dos niños constantemente activos, mi entusiasmo por el estudio de la genética celular y de la evolución aniquilaba cualquier pensamiento de convertirme en ama de casa a jornada completa. Más que maridos, siempre había querido hijos. A diferencia de mis propios padres, el whisky y los cigarrillos, el póquer y el bridge, las reuniones y la política, los cotilleos y el golf, me resultaban insopportablemente aburridos. Yo, por mi parte, era insufriblemente lectora, seria y estudiosa y prefería la compañía de los bebés, el barro, los árboles, los fósiles, los cachorros y los microbios al mundo normal de los adultos. Todavía la prefiero.

En Berkeley no había ninguna relación entre los miembros del departamento de paleontología, donde se estudiaba la evolución, y los del departamento de genética, donde la evolución era escasamente mencionada. Puesto que yo buscaba una educación en todos los aspectos de la evolución, la paleontología y la genética que pudiera iluminar la historia evolutiva de las células, al principio me impresionó el rigor del *apartheid* académico. Cada departamento parecía ajeno a las personas y materias que estaban fuera de sus fronteras. Es más, como casi todos los genetistas bacterianos del Laboratorio de Virus Bacterianos (LVB) de la zona este del campus empezaron sus carreras como químicos, la mayoría estaban abismalmente desinformados acerca de la genética de las células animales y vegetales. Pocos habían oído hablar alguna vez de herencia citoplásmica o de orgánulos en las células nucleadas. Ningún genetista bacteriano, microbiólogo o virólogo de ese extremo del campus sabía nada sobre sistemas genéticos en el citoplasma de las algas. Algunos eran tan bacteriocéntricos que a duras penas comprendían la mitosis, el tipo de división celular que caracteriza a las células con núcleo. Evidentemente, nunca enseñaban ni reflexionaban acerca de una variación especial de la mitosis, llamada meiosis, que subyace tras las reglas de la herencia mendeliana. Muchos desconocían casi completamente aquella herencia que

sólo es aplicable a organismos nucleados. Estos advenedizos de la biología —educados en física y química— eran tan presuntuosos que ni siquiera sabían que no sabían. Muchos transmitían su sofisticación química, pero también su ignorancia biológica y su arrogancia, a sus becarios y estudiantes. La facultad del LVB y sus estudiantes tampoco habían oído hablar del excitante trabajo en herencia citoplásrica de una rama entonces en progreso de la ciencia de la genética, la genética de ciliados. Ni siquiera los miembros del departamento de genética, en el extremo oeste del campus, estaban al tanto de la ciencia de la genética de ciliados que tan interesante me parecía a mí. Su falta de interés e ignorancia me sorprendieron pero no me disuadieron. La genética de *Paramecium*, el ciliado, y su líder Tracy Sonneborn (1895-1970) me habían fascinado desde que tuve noticias de ellos por primera vez. Lo que Sonneborn y su colega francesa Jannine Beisson habían descubierto parecía contradecir plenamente el dogma omnipresente de que las características inducidas no podían ser heredadas. Sonneborn, que fue durante mucho tiempo catedrático de genética en la Universidad de Indiana, y la investigadora Beisson informaron de que si los cilios de *Paramecium* son eliminados quirúrgicamente en grupo con sus bases y son colocados en la superficie de la célula a 180 grados de la posición original, es decir, son resituados, los cilios aparecerán en las células prole durante muchas generaciones futuras en esta posición alterada. En otras palabras, los cilios se reproducían y el cambio introducido experimentalmente por los científicos era heredado durante al menos doscientas generaciones después de la operación. Aquí había un ejemplo de laboratorio de la llamada herencia de características adquiridas que la ortodoxia rechazaba como lamarckianismo.

El desarrollo de mis intereses en tales asuntos era ya entonces un solitario ejercicio intelectual. A medida que la orientación política de la década de los sesenta se aceleraba, más y más tiempo y discusiones de la academia eran dedicados a la «relevancia», con el resultado de que cualquier propósito intelectual era valorado en relación con el bienestar humano. En este clima, mi interés por los patrones de la herencia celular era

antisocial. Lo que más me preocupaba a mí era irrelevante para mis instructores y para la mayoría de mis compañeros.

La genética, a pesar de los genetistas bacterianos de Berkeley, todavía me parecía la clave de la historia evolutiva. Recoleté más ejemplos de herencia no mendeliana (no nuclear) en un diverso abanico de especies: plantas tales como *Eupatorium*, *Zea* (maíz), *Mirabilis jalapa* y *Oenothera*, y algas como *Chlamydomonas*. Estudié los mutantes no nucleares deficientes en respiración de oxígeno de las levaduras llamadas «petites» que crecen lentamente y forman pequeñas colonias. También revisé el patrón de herencia de la cepa «Kappa-asesina» del ciliado *Paramecium*. Este fenómeno fue maravillosamente investigado y descrito por Tracy Sonneborn, quien observó que algunos paramecios nacían para matar a otros que eran genéticamente distintos. Y nunca sentí que la herencia no nuclear fuera «no-clara». H. J. Muller (1890-1967), un genetista que más tarde recibiría el premio Nobel por demostrar cómo los rayos X inducen el cambio hereditario (mutación), había proclamado la existencia de genes desnudos, por lo menos en principio, en el escenario central de la vida. A pesar de su elegante trabajo, yo no creía que nadie hubiera conseguido probar que existen «genes desnudos» fuera del núcleo de las células animales o vegetales. Estudié minuciosamente el antiguo pero brillante trabajo de Edouard Chatton (1883-1947), un biólogo marino francés, y de Lemuel Roscoe Cleveland (1892-1969), catedrático de Harvard e investigador científico. Leí miríadas de artículos de Tracy Sonneborn, un magnífico escritor que pensaba en alto mientras trabajaba. Persegui en las imprentas las fantásticas fotografías de alta resolución de orgánulos llamadas micrografías electrónicas que habían sido tomadas en Madison por Hans Ris, mi iconoclasta y entregado profesor de la Universidad de Wisconsin. Estas dispares fuentes de información corroboraron mi corazonada. Eran bacterias, y no genes desnudos, lo que residía fuera del núcleo pero dentro de las células de determinados protistas, levaduras, e incluso plantas y animales. A medida que revisaba la literatura sobre genética citoplásmica resultaba obvio que por lo menos tres clases de orgánulos limitados por membrana (plastos, mitocondrias y cilios), todos

ellos fuera del núcleo, se parecían a las bacterias en su comportamiento y en su metabolismo. De hecho, diferenciar entre una bacteria atrapada en una célula y un orgánulo heredado que forma parte de una célula me parecía en algunos casos imposible. Una bacteria verde azulada atrapada que se despoja de su pared para residir y crecer confortablemente en el citoplasma de una célula vegetal parecía ser exactamente el orgánulo que todos llamaban cloroplasto.

Animada por mis incursiones intelectuales en esta literatura de la genética de orgánulos citoplásmicos, predijo que el plasto, de soltero una bacteria, debía retener algún ADN bacteriano.

Lo que empezó como investigación de biblioteca en el departamento de genética de la Universidad de California en Berkeley ha proseguido hasta hoy en día. Todavía acaparo codiciosamente artículos científicos sobre simbiontes microbianos y orgánulos limitados por membrana. Mis estudiantes y yo todavía trabajamos en la idea central: el origen de las células con núcleo se corresponde exactamente con la integración evolutiva de comunidades bacterianas simbióticas.

La primera versión completa de mi «teoría de la endosimbiosis serial» fue publicada tras cerca de quince condolidos rechazos y la pérdida de un manuscrito anterior, penosamente intrincado y mal redactado. Con el nombre de «Origin of Mitosing Cells» (Origen de las células mitóticas), fue finalmente aceptado para su publicación en 1966 gracias a la intervención personal de James F. Danielli, entonces editor de la atrevida revista *Journal of Theoretical Biology*. El artículo, cuando apareció finalmente a finales de 1967, llevaba evidentemente mi primer nombre de casada, Lynn Sagan. La teoría recibió de otro aficionado a los protistas, el profesor Max Taylor de la Universidad de British Columbia, en Vancouver, el apodo de SET, acrónimo de *Serial Endosymbiosis Theory* (teoría de la endosimbiosis serial, que no hay que confundir con SETI, la búsqueda de inteligencia extraterrestre).

Hasta 1969, bien avanzado mi segundo matrimonio y embarazada de mi hija Jennifer, no me había visto obligada a permanecer en casa durante largos períodos de tiempo. La estancia forzosa en casa me permitió pensar sin interrupción. Esto, a su vez, me estimuló a documentar con minucia la

versión ampliada de mi narración, en cuatro partes, de la SET. El relato del origen de las células que comenzó en mi artículo de 1967 germinó, creció y fue pulido y podado con el tiempo, en forma de manuscrito con longitud de libro. Me pasé muchas noches frente a la máquina de escribir, resuelta a cumplir con el plazo que figuraba en el contrato. Por supuesto, como virtual desconocida que era, no me dieron un adelanto ni compensación alguna por las muchas ilustraciones que encargué. Toda la ayuda vino de casa. Finalmente completé lo que yo pensaba que era el borrador final. Con cuidado y orgullo, antes incluso de que se oyieran las primeras voces matinales de los niños, empaqueté y eché al correo la obra plagada de ilustraciones para la editorial con la que tenía el contrato: Academic Press, en la ciudad de Nueva York. No enviaron acuse de recibo. Esperé. Durante casi cinco meses continué esperando. Un día el paquete, enviado como impreso, reapareció en mi buzón. Mucho más tarde fui informada de que una evaluación extremadamente negativa había obligado a la editorial a retener el manuscrito durante meses. Finalmente recibí una carta-tipo de rechazo de Academic Press. Ninguna explicación, de hecho ni siquiera una nota personal firmada por el editor, acompañaba al rechazo formal. Más de un año después, tras un trabajo más penoso y largo que ninguno que me proporcionara Jenny jamás, el libro finalmente fue editado, producido y publicado por Yale University Press. Gracias a los comentarios y críticas de Max Taylor y otros generosos colegas, la teoría de la endosimbiosis serial prevaleció y con el tiempo el dolor del rechazo de Academic Press remitió.

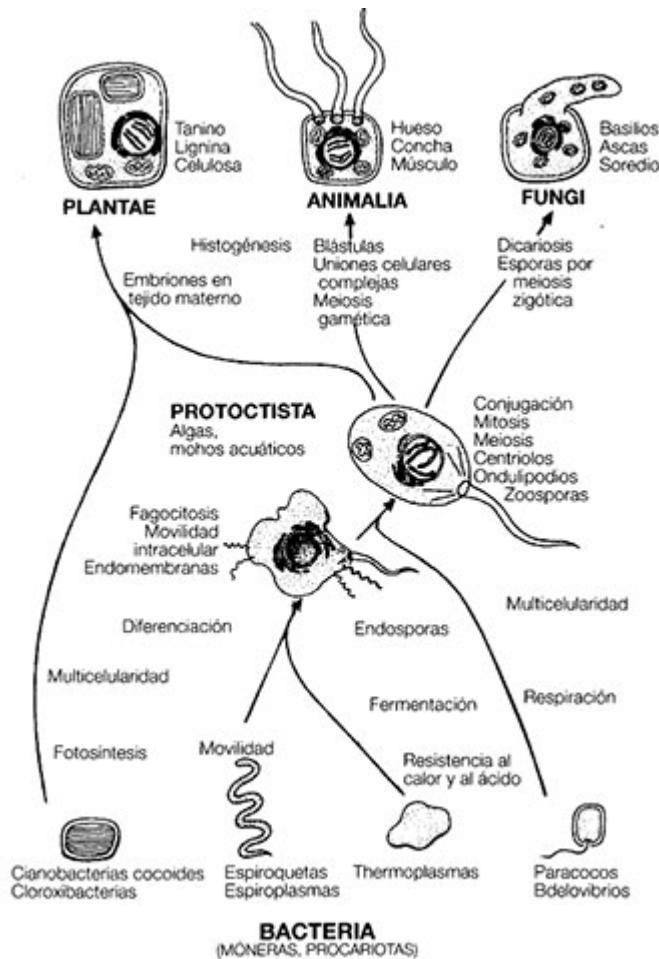


Figura 2. Filogenia de la SET (teoría de la endosimbiosis serial).

A lo largo de los setenta y los ochenta la SET atrajo contribuciones experimentales de muchos científicos y estudiantes de doctorado que yo desconocía. Todos los estudios de biología molecular, genética y microscopía de alta resolución tendían a confirmar la idea decimonónica, y en su momento radical, de que las células de las plantas y de nuestros cuerpos animales, así como las de los hongos y otros organismos compuestos de células con núcleo, se originaron mediante fusiones de diferentes tipos de bacterias siguiendo una secuencia específica. La convivencia prevaleció y proliferó. Mi versión más actual de la SET aparece en la Figura 2. Hoy me sorprende ver cómo en los institutos y en los textos universitarios se enseña una versión diluida, como si se tratara de una verdad descubierta. Encuentro, para mi desgracia aunque no para mi

sorpresa, que la exposición es dogmática, lleva a la confusión, no está argumentada con lógica, y con frecuencia es francamente incorrecta. A diferencia de la propia ciencia, ahora la SET es aceptada sin crítica. Así son las cosas.

La SET es una teoría de reuniones, de mezcla de células con diferentes historias y habilidades. Antes de la SET no había sexo de fusión celular como el del óvulo fertilizado por el espermatozoide. La SET hizo posible nuestra clase de fusión sexual. También el sexo es una reunión, la mezcla de células con diferentes historias y habilidades.

3. INDIVIDUALIDAD POR INCORPORACIÓN

Sucumbo ante un problema
Y otro problema aparece—
Mayor que el mío —más Sereno—
Que implica cifras magníficas (69)^[IV]

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 las plantas, los animales y otras células con núcleo emplea cuatro postulados demostrables. Los cuatro implican simbiogénesis, incorporación y fusión corporal por simbiosis. 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 flores de *Zebrina* y *Tradescantia* («judío errante»), están hechos de filas de células vegetales como éas. 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 algal verde. 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 *serial* de la *teoría de la endosimbiosis serial* 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 originaron 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.

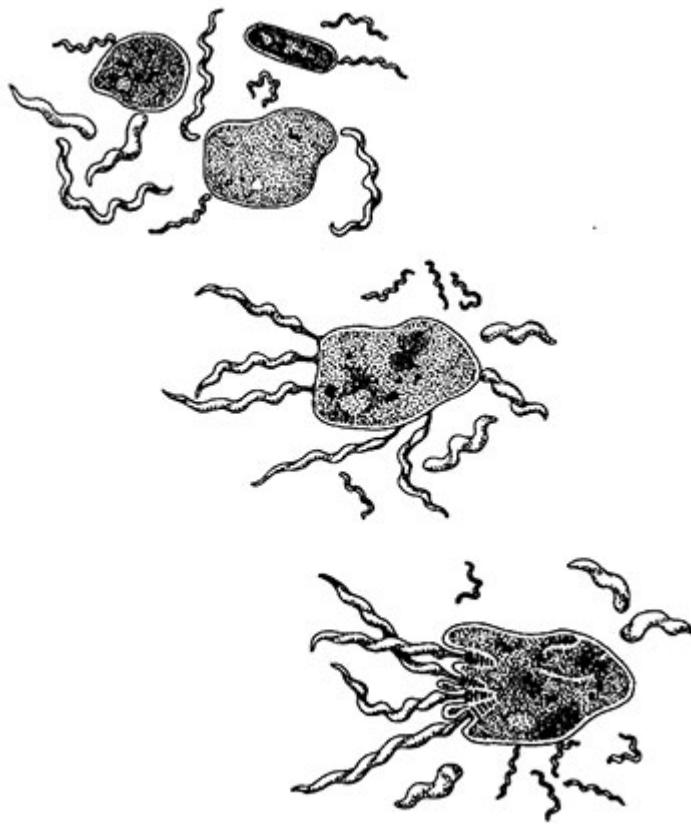


Figura 3. Las espiroquetas se convierten en ondulipodios.

Si los simbiontes 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.

Intentaré resumir la idea de forma tan simple como me sea posible. En primer lugar, un tipo de bacteria amante del azufre y del calor, llamada arqueobacteria fermentadora (o termoacidófila), se fusionó con una bacteria nadadora. 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. Este temprano protista nadador era, como sus descendientes actuales, un organismo anaerobio. Envenenado por el oxígeno, vivía en ricas arenas y lodos orgánicos, en grietas de las rocas, en charcos y estanques donde este elemento estaba ausente o era

escaso. Las células animales, vegetales y fúngicas (las células fúngicas incluyen las de las setas y las de las levaduras) 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 prototistas y los hongos, evolucionó en los más tempranos organismos con núcleo. Después de que evolucionara la mitosis en los protistas nadadores, otro tipo de microbio 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 asombrosos que nadaban y respiraban oxígeno, aparecieron por primera vez sobre la Tierra quizá tan pronto como hace unos 2000 millones de años.

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-célula-compleja, los respiradores de oxígeno engulleron, ingirieron, pero no pudieron digerir bacterias fotosintéticas de color verde brillante. La literal «incorporación»

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. 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 serial. 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 innumerables 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 estuvieron 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 simbiontes. Algunas 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. 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 formación de nuevos órganos y organismos mediante fusiones simbióticas. Como mostraré, es un hecho fundamental de la evolución. Todos los organismos lo suficientemente grandes como para que podamos verlos están compuestos de microbios, 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 serial (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 termoplasmata») (paso 1). Las

mitocondrias respiradoras de oxígeno de nuestras células y otras células nucleadas evolucionaron a partir de simbiontes bacterianos ahora llamados bacterias púrpura o proteobacterias (paso 3). Los cloroplastos y otros plastos de algas y plantas fueron en su tiempo cianobacterias fotosintéticas de vida libre (paso 4). 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 bacteria no se unió a la antigua alianza. La primera fusión, la fusión permanente del primer y el segundo socio, fue crucial. Sucedió. Incluso 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 microbio 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 2000 millones de años. La idea clave de la SET (el paso 2) 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 polvorrientos 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 plastos 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 plastos 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 1000 millones de años después de su fusión inicial, retienen sus propias reservas reducidas de ADN. Los genes del ácido desoxirribonucleico (ADN) 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 plastos son muy parecidos a los de las cianobacterias. A principios de los setenta, cuando se compararon por primera vez las secuencias de nucleótidos del ADN de los plastos de las células algales con las secuencias de las cianobacterias de vida libre, ¡se descubrió que el ADN del cloroplasto era mucho más parecido al ADN de la cianobacteria que al ADN del núcleo de la propia célula algal! El caso se cerró. La comparación trilateral de estas secuencias de ADN (del núcleo, del orgánulo y del codescendiente de vida libre del orgánulo) demostró el origen bacteriano de los plastos. Se abrió un caso análogo para esos orgánulos menos coloridos, las mitocondrias. No hizo falta que testificara ningún viajero del tiempo.

Max Taylor es el mayor experto mundial en ciertos fascinantes y coloridos protistas marinos. Él y casi todos los demás les llaman dinoflagelados. Yo me niego tercamente a seguir esta línea y les llamo dinomastigóforos porque soy alérgica al término flagelo cuando no se aplica a bacterias. Las bacterias tienen flagelos y, desde mi punto de vista, los organismos con núcleo jamás los tienen.

En un momento dado Max desarrolló explícitamente hipótesis alternativas a mi teoría de la endosimbiosis serial. A principios de los setenta, esbozó una teoría endógena o de «filiación directa»; una teoría específicamente no simbiótica para el origen de las células nucleadas. Su perspectiva se oponía directamente a la mía. La teoría de la filiación directa mantiene que los tres tipos de orgánulos citoplásmicos —mitocondrias, cilios y cloroplastos— evolucionaron sin mediación de la simbiosis. Es

más, según la teoría de Max y del resto de la opinión presimbiogenética, todos ellos surgieron como «pellizcos» del ADN del núcleo. Las mitocondrias, los plastos y los cilios siempre fueron parte de las células. Nunca fueron extrañas bacterias. La teoría de la filiación directa no sólo era el bebé teórico de Max sino que además estaba de acuerdo con las asunciones implícitas de evolución por ramificación frente a fusión que mantenían todos los biólogos.

Para ser riguroso, y poder manejar enormes cantidades de información detallada, Max catalogó posibles versiones alternativas de las teorías de la filiación directa y la simbiosis. La filiación directa, en su versión más radical, niega la existencia de cualquier clase de simbiosis celular. Las células nucleadas evolucionaron directamente a partir de orígenes separados o de cambios en un único tipo de ancestro bacteriano. Los plastos, el término general que engloba a los orgánulos fotosintéticos de las algas y las plantas, incluyen los famosos cloroplastos de las algas verdes y sus descendientes vegetales. La categoría también incluye a los rodoplastos rojos de las algas marinas rojas y los feoplastos pardos que se encuentran en los dinomastigóforos, las diatomeas, las feofitas y muchas otras algas. La versión más suave de la teoría de la simbiosis postula que sólo los plastos evolucionaron a partir de bacterias fotosintéticas simbióticas y que las mitocondrias y los demás orgánulos surgieron sin mediación de la simbiosis, por filiación directa, a partir de genes que abandonaron el núcleo celular. Después hay una SET intermedia que acepta los orígenes simbióticos tanto de los plastos como de las mitocondrias. Hoy la versión intermedia es indiscutible. Como se explica en los libros de texto, la mayoría de las pruebas apuntan hacia esta idea.

Max Taylor no actúa injustificadamente cuando me tacha de simbiogenetista radical y considera «extrema» mi versión de la SET. ¿Por qué? Porque, a pesar de las escasas pruebas con las que contamos, todavía creo en los nadadores de las Figuras 2 y 3. Desde mi punto de vista, las otras clases de orgánulos (paso 2 del esquema) son también bacterianos en su origen. Los cilios, las colas de los espermatozoides, las protuberancias sensoriales y otros látigos celulares que siempre tienen debajo unos

diminutos puntos, los cuerpos llamados centríolo-cinetosomas, vienen del paso 2. Estas estructuras están asociadas con el movimiento celular. Los orgánulos del paso 2, puesto que son todavía más antiguos y están más fuertemente integrados dentro de las células que las mitocondrias y los cloroplastos, poseen una historia evolutiva enormemente difícil de rastrear.

Parte del problema de explicar el origen de los orgánulos del paso 2 es que esta clase de estructuras celulares móviles tiene muchos nombres, todos ellos confusos. La parte crucial de la teoría comienza con el punto que hay bajo el cilio.

Los enigmáticos centríolo-cinetosomas actúan como diminutas semillas. Las colas de los espermatozoides, los cilios y, en algunos organismos, el huso mitótico fundamental para el movimiento de los cromosomas durante la división celular, se extienden de forma casi mágica a partir de las pequeñas semillas. A una célula, dependiendo de su ascendencia, le podrían crecer uno o muchos centríolo-cinetosomas, ya sea en conexión con centríolos preexistentes ya sea aparentemente de la nada (esto último se denomina aparición *de novo* de centríolo-cinetosomas). La sincronización es crucial. Una célula desnuda puede formar muchas «semillas» de centríolo-cinetosoma que darán lugar, todas al mismo tiempo, a protuberancias. Todas las «semillas» de centríolo-cinetosoma están hechas de delgados tubos de proteína, los microtúbulos. Naturalmente, la proteína que forma las paredes de los tubos se llama tubulina.

La aceptación del origen simbiótico de las mitocondrias y los plastos culminó cuando se descubrió que ambos tipos de orgánulos contienen un ADN distintivo, separado del nuclear e inequívocamente bacteriano en su estilo y organización. El ADN de estos orgánulos codifica sus propias y peculiares proteínas. Exactamente igual que en las bacterias de vida libre, la síntesis de proteínas tiene lugar dentro de las mitocondrias y los plastos. Ford Doolittle y Michael Gray, biólogos moleculares de la Universidad de Dalhousie en Halifax (Nueva Escocia), mostraron secuencias de ADN en las mitocondrias y los plastos extremadamente similares a las de determinadas bacterias que viven por su cuenta. En este momento los

científicos aceptan estas y otras muchas pruebas como evidencia de la versión moderada, «sólo-tres-de-cuatro», de la SET.

¿Pero qué pasa con mi teoría «extrema»? ¿Hay acaso un vestigio bacteriano diferente, un ancestro centriolo-cinetosoma de las células nucleadas eucarióticas? ¡Yo pienso que fue la integración de la bacteria centriolo-cinetosoma lo que conformó la célula eucariótica por primera vez! Si estoy en lo cierto, la simbiogénesis es el factor que distingue a toda la vida nucleada de la vida bacteriana. Evolucionaran o no un grupo de organismos por simbiogénesis, no existe un término medio. Yo sostengo que todos los organismos nucleados (prototistas, plantas, hongos y animales) surgieron por simbiogénesis cuando las arqueobacterias se fusionaron con los ancestros del centriolo-cinetosoma durante la evolución del ancestro prototista final: la célula con núcleo.

El que fuera un extraño y después se convirtiera en el centriolo-cinetosoma todavía tiene parientes de vida libre. Son las bacterias conocidas como espiroquetas. Sus ancestros, los antiguos y salvajes serpenteadores, hambrientos y desesperados, invadieron muchas arqueobacterias, algunas incluso parecidas a las actuales *Thermoplasma*. Las invasiones fueron seguidas de treguas. Yo postulo que las células nucleadas más tempranas emergieron después de que las espiroquetas y las arqueobacterias sobrevivieran en estado fusionado. La célula con núcleo evolucionó mediante simbiogénesis.

Existen otras versiones «extremas» de la SET. Sin entrar en detalles, el doctor Hyman Hartman, un investigador que trabaja en el Ames Research Center de la NASA en Moffett Field (California), sugiere que el propio núcleo comenzó como una bacteria de vida libre. La visión de «el núcleo como simbionte» no fue expresada por primera vez por el vivaz e hirsuto Hartman, sino por el ruso K. S. Merezhkovsky, que murió en 1921. Merezhkovsky nunca dijo que las mitocondrias comenzaran como simbiontes porque, por aquella época, ni él ni ningún otro comprendían qué eran las mitocondrias. Hasta la llegada del microscopio electrónico, un instrumento de enorme resolución, había cerca de veinte términos para esos pequeños cuerpos que hay dentro de las células, más tarde reconocidos

como mitocondrias. Los términos se fusionaron y su significado se aclaró a mediados de los sesenta a medida que mejoraba la microscopía.

No estoy de acuerdo con Hartman o Merezhkovsky en que el núcleo tenga orígenes simbióticos. Que yo sepa, en el mundo microbiano no hay bacterias nucleiformes de vida libre. El núcleo, desde mi punto de vista, evolucionó en respuesta a la incómoda fusión de bacterias parecidas a *Thermoplasma* y parecidas a *Spirochaeta*. Emergieron «nuevas células», aumentaron de tamaño y sus membranas en interacción proliferaron. Su genética se hizo más compleja debido a su doble ascendencia.

Radney Gupta, de la Universidad McMaster, continúa presentando pruebas detalladas, aunque quizá arcanas, de la naturaleza «quimérica» de las más tempranas células nucleadas. Los argumentos de Gupta están basados exclusivamente en el análisis de la secuencia de aminoácidos de muchas proteínas indispensables. Utiliza términos diferentes y criterios distintos pero nuestras ideas básicas son las mismas: la fusión arqueo-eubacterial generó los primeros ancestros celulares con núcleo limitado por una membrana.

El origen de las células nucleadas, y en eso todo el mundo está de acuerdo, fue una innovación crucial en la evolución de la vida sobre la Tierra. Los primeros microbios que exhibieron un núcleo eran pequeños nadadores que huían del oxígeno. Hoy serían clasificados en el reino protoctista. Los miembros vivientes más pequeños de este heterogéneo grupo son tan diminutos como las bacterias; pero puesto que tienen núcleo y muchos otros rasgos de las células nucleadas, aunque vivan en zonas donde no hay oxígeno, no son bacterias.

¿Qué sucedió? Cuando lo comparamos con cualquier ambiente extracelular, siempre expuesto a la desecación, la carencia de alimento, el envenenamiento y otras tragedias potenciales, el espacio intracelular es acuoso y rico en nutrientes. Cualquier espiroqueta (u otra bacteria nadadora) que penetrara la barrera de la membrana de una arqueobacteria disfrutaría de un suministro constante de energía y alimento. Las tasas de reproducción del atacante y el atacado finalmente se coordinarían; los supervivientes de los nadadores que saturaran su hogar no sobrevivirían

mucho tiempo. Hoy sabemos que los invasores se convierten en simbiontes y que, con tiempo, pueden llegar a convertirse en orgánulos. Tras las fusiones surgieron nuevos trucos de supervivencia. Imagino células serpenteantes que huían del oxígeno pegadas a los bordes y las entrañas de las arqueobacterias, como siempre en busca de alimento regular. Habitadas por los serpenteadores, las arqueobacterias infectadas aumentaron su velocidad porque sus agregados extranjeros nunca dejaban de moverse. Las células con núcleo se dividen para reproducirse mediante la mitosis, un proceso que ha recibido el apodo de «la danza de los cromosomas». En algún otro sitio he descrito cómo creo yo que se originó este tipo de división celular a partir del incesante movimiento de las espiroquetas vivas.

Mis estudiantes de doctorado, antiguos y actuales, y yo misma continuamos contrastando la hipótesis «extrema». En nuestro hipotético argumento, se pueden detectar pistas de la arcaica fusión en el comportamiento y las reacciones químicas modernas de todas las células nucleadas. Evidentemente necesitamos más pruebas, incluso para acabar de convencernos a nosotros mismos.

En la evolución el orden de los acontecimientos es decisivo. Las espiroquetas con forma de sacacorchos, los bólidos del mundo microbiano, parecen serpientes helicoidales. Estas bacterias se abren paso vertiginosamente, hacia adelante y hacia atrás, hacia arriba y hacia abajo y hacia derecha e izquierda, a través de los fluidos viscosos como el lodo, los geles, el mucus y el tejido vivo. En el pasado remoto, como ahora, adelantaban a las demás bacterias. Rápidas y prolíficas, las espiroquetas invadieron el espacio interno de las arqueobacterias y aquellas que interactuaron sobrevivieron. Sus descendientes vivos están ahora inextricablemente involucrados en los movimientos mitóticos y otras actividades de las células complejas. Los socios están tan fusionados que la trama del origen es difícil de reconstruir, pero no imposible.

Todas las células con mitocondrias tienen también microtúbulos, vestigios de los antiguos serpenteadores. Esto es coherente con la idea de que la simbiosis espiroqueta-arqueobacteria fue establecida en primer lugar. Hoy en día, ciertas células nadadoras mitóticas para las que el oxígeno es

un veneno carecen todavía de mitocondrias. Deduzco que el ancestro mitótico de toda la vida eucariótica evolucionó antes de que el oxígeno permeara todos los rincones de la atmósfera.

Las espiroquetas actuales nadan tanto en ambientes ricos como pobres en oxígeno. A veces se unen a sus vecinos tan hábilmente que los biólogos confunden sus puntos de unión con centríolo-cinetosomas y sus cuerpos con cilios. Las espiroquetas de hoy en día moran en enormes números en los intestinos de insectos sanos que comen madera. Unas cuantas clases habitan el tejido intestinal o testicular humano. Algunas progresan en el lodo. Otras viven sobre las permeables membranas de protistas como los mohos plasmódiales del fango o las tricomonas. En general, las espiroquetas se desarrollan en hábitats húmedos, ricos y oscuros. La vida de la espiroqueta es retorcerse, alimentarse y clonarse. Se reproducen mediante división transversal de estilo bacteriano. La ruta hasta los cilios comenzó cuando las tempranas espiroquetas se introducían dentro de sus vulnerables vecinos siempre que podían y algunas nunca regresaban al exterior. A partir del movimiento mutuo de muchas pequeñas espiroquetas, y tras un largo proceso de integración, evolucionaron los nadadores nucleados: los primeros protistas.

Todavía albergo la esperanza de que el postulado final de la SET prevalecerá. Muchos colegas me han sugerido que me rinda.

A los centríolos y los cinetosomas, como a unos afables doctor Jeckyll y Mr. Hyde, nunca se les ve juntos al mismo tiempo en las células en proceso de división. En muchas células, los centríolos se transforman en cinetosomas que provocan el crecimiento de sus haces tan pronto como termina la división celular mitótica. Esto señala hacia una única identidad. En 1898 L. F. Henneguy, un catedrático de fisiología parisino, y Mihaly von Lenhossek, en Budapest, se dieron cuenta de la identidad única del centríolo y el cinetosoma en tejidos animales y escribieron sobre ello. La idea de que los centríolos mitóticos se reproducen, se trasladan desde los polos mitóticos y se convierten en los cinetosomas de los cilios es la «teoría Henneguy-Lenhossek». Demostrada mediante microscopía electrónica después de la muerte de ambos científicos, la validez de la teoría

Henneguy-Lenhossek inspira mi utilización del doble nombre de centríolo-cinetosoma. Las espiroquetas, en mi opinión, formaron originalmente estructuras de unión con arqueobacterias permisivas. A medida que se iban integrando simbiogenéticamente el punto de su unión se convirtió en el centríolo-cinetosoma de hoy en día. El biólogo de la Universidad de Oxford David C. Smith compara los teóricos restos de espiroquetas simbióticas en las entrañas de las células nucleadas con el Gato de Cheshire de Lewis Carroll. De la misma forma que el gato desaparece lentamente pero deja una enigmática sonrisa flotando en el aire, «el organismo progresivamente pierde partes de sí mismo, mezclándose lentamente con el escenario general, siendo delatada su anterior existencia por alguna reliquia»^[20]. El ser fundido se convierte en parte constituyente del otro socio participante. Cuando la fusión es completa es difícil determinar las contribuciones genéticas relativas de los socios.

En nuestro laboratorio buscamos ácidos nucleicos y proteínas más comunes entre las bacterias espiroquetas de vida libre y los cilios que entre otros organismos u orgánulos celulares elegidos arbitrariamente. Hay muchos estudios en curso, la mayoría en laboratorios de orientación médica cuyos científicos no están interesados en la evolución. Mi principal cometido es estar pendiente de sus hallazgos.

Algunas células pueden soportar el frío hasta temperaturas cercanas al cero absoluto. El metabolismo cesa. El flujo de nutrientes, desperdicios y energía se detiene. Sin embargo cuando son recalentadas, estas células funcionan y crecen perfectamente. La célula recuerda; la información de la vida es intrínseca a su estructura celular. Las colas seccionadas de los espermatozoides, sin núcleo, sin mitocondrias e incluso sin membrana exterior, sobreviven y nadan durante casi una hora en soluciones adecuadamente equilibradas y dotadas de energía. Yo pienso que las colas de los espermatozoides, los cilios de los protistas ciliados, los cilios de las trompas de Falopio de las mujeres y los presentes en nuestras gargantas (todos ellos formas de ondulipodios con su característica estructura de nueve conjuntos de microtúbulos) derivaron de espiroquetas de vida libre que se integraron en nuestra arqueobacteria ancestral. Soy optimista

respecto a que, cuando sean identificados y secuenciados los genes para las proteínas de la motilidad y las propias proteínas de la motilidad y otras relevantes —incluso más importantes porque cambian menos rápidamente— tendremos finalmente pruebas.

El dato más importante para el origen bacteriano de los centriolo-cinetosomas es el descubrimiento de lo que podría ser ADN vestigial en un microbio verde nadador. John Hall, David Luck y Zenta Ramanis, de la Universidad Rockefeller, han encontrado en el alga verde *Chlamydomonas* genes especiales que codifican rasgos que influyen en las estructuras de natación de los centriolo-cinetosoma-microtúbulos. Estos genes estaban agrupados juntos y separados de los genes nucleares estándar. En cuanto leí el trabajo de los científicos de la Rockefeller me convencí de la validez de la SET «extrema». Todavía nadie ha separado el ADN del centriolo-cinetosoma del otro ADN de la célula, así que, por supuesto, los genes del centriolo-cinetosoma no han sido comparados directamente con los genes de las espiroquetas de vida libre. Es más, estos científicos afirman que el conjunto específico de genes relacionados con los centriolo-cinetosomas y sus ondulipodios están dentro del núcleo. Han fotografiado ADN muy cerca de los dos centriolo-cinetosomas del alga en proceso de reproducción. El ADN del centriolo-cinetosoma, distingible del resto del ADN nuclear en algunas fases del desarrollo de la célula, se junta con el resto del ADN cromosómático durante la división celular mitótica.

Incapaces de detectar el ADN del centriolo-cinetosoma en esta misma alga verde, Joel Rosenbaum, de la Universidad de Yale, y otros investigadores niegan su existencia. Incluso las pruebas circunstanciales a favor de la hipótesis de la espiroqueta son desoladoramente escasas. Yo estoy preparada para estar equivocada. Quizá bacterias distintas de las espiroquetas, tales como un tipo de eubacteria verde no sulfúrica según conjetura Gupta, se infiltraron hace mucho tiempo en otras células. Quizá la simbiosis no estuvo involucrada tampoco en el origen de los más tempranos eucariotas nadadores. Desde luego, Carl Woese y el colega de Max Taylor, Cavalier-Smith, están en desacuerdo conmigo. No ven papel alguno para la simbiogénesis en el origen de los más tempranos protistas anaeróbicos. Sin

embargo, no creo que haga falta un Sherlock Holmes para sugerir que en el pasado arcaico un actor microbial aumentó enormemente la velocidad de natación de lo que se convirtió en un consorcio. El descendiente idéntico de la motilidad ha permanecido.

Las neuronas, las células nerviosas de nuestro cerebro, y los nervios periféricos están repletos de microtúbulos hechos de la proteína tubulina. Los mismos microtúbulos, exactamente los mismos, constituyen los cilios, las colas de los espermatozoides y las paredes de los centriolo-cinetosomas. Los axones y las dendritas, extensiones de las células nerviosas mediante las cuales procesamos información en nuestro cerebro, tienen microtúbulos en su interior. Si mi teoría radical de la simbiogénesis es correcta, nuestro propio cerebro y la capacidad de pensamiento necesaria para leer esta frase fueron posibles gracias a los microtúbulos de proteína que evolucionaron por primera vez en las bacterias. Incluso si la investigación demuestra que mi hipótesis de las espiroquetas es falsa, el mismo hecho de pensar en la simbiosis es un fenómeno simbiótico. El oxígeno que respiramos penetra en nuestro cerebro procedente de la corriente sanguínea y es incesantemente metabolizado por las mitocondrias que sabemos que son antiguas bacterias respiradoras. Estén o no las serpenteantes espiroquetas en el centro de nuestro ser, seguimos siendo seres simbióticos sobre un planeta simbiótico.

4. EL NOMBRE DE LA VID

Mucha Locura es la más divina Sensatez—
Para un Ojo sagaz—
Mucha Sensatez —es la más absoluta Locura—
La Mayoría
En esto, como en Todo, prevalece—
Asiente —y estarás cuerdo—
Objeta —e inmediatamente eres peligroso—
Y serás Encadenado— (435)^[V]

Los nombres de los seres vivos parecen bastante inofensivos. También las agrupaciones. Aun así la práctica superficialmente aburrida de dar nombre y agrupar ha afectado en profundidad a mi vida científica. La imperfecta taxonomía induce a confusión con la misma sutileza que las asunciones no comprobadas o las creencias religiosas. Una de las razones de que la aceptación de la simbiogénesis se haya retrasado es que choca directamente con presunciones comunes y respetadas.

La taxonomía es la ciencia de identificar, dar nombre y clasificar a los organismos. Los nombres y los esquemas de clasificación organizan grandes cantidades de información. Las taxonomías, como los mapas, ponen de relieve características seleccionadas y distintivas. Sin embargo, utilizando la popular frase del antropólogo y filósofo angloamericano Gregory Bateson, «el mapa no es el territorio». Tampoco lo es el nombre del organismo. La historia de cualquier organismo se representa con frecuencia en un árbol familiar. Estos crecen normalmente del suelo hacia arriba: un único tronco se ramifica dando muchos linajes separados, divergiendo cada una de las ramas a partir de ancestros comunes. Pero la simbiosis nos muestra que tales árboles son representaciones idealizadas del

pasado. En realidad, el árbol de la vida a menudo crece hacia dentro a partir de sí mismo. Las especies se juntan, se fusionan y constituyen nuevos seres que vuelven a empezar. Los biólogos llaman a la reunión de las ramas —ya sean vasos sanguíneos, raíces o hifas de hongo— anastomosis. Anastomosis, ramas que forman conjuntos, es una palabra maravillosamente onomatopéyica. Se puede escuchar la fusión. El árbol de la vida es una entidad enmarañada, retorcida y pulsante, con raíces y ramas que se encuentran bajo la tierra y en el aire para formar excéntricos frutos nuevos e híbridos. La anastomosis, aunque menos frecuente, es tan importante como la ramificación. Como el sexo, la simbiosis reúne a seres previamente evolucionados para formar nuevas asociaciones. También como el sexo, algunas simbiosis son uniones prolongadas con un futuro prolífico y estable; otras se disuelven rápidamente. La interacción de cada generación de seres genéticamente continuos pone en cuestión cualquier árbol de la vida extraído de un libro de ilustraciones.

Utilizando el dibujo ahora famoso, creado a mediados de los ochenta por Dorion Sagan, mi hijo mayor, y que ha sido mejorado por muchos otros, nosotros empleamos la metáfora de una mano (Figura 4). Cada uno de los cinco dedos representa un grupo principal de organismos. Imagina cada uno de los dedos como uno de los cinco grandes mundos: todas las bacterias (las móneras o procariotas cuyas células carecen de núcleo), los protoctistas (todas las algas, hongos mucosos, ciliados y muchos otros oscuros organismos formados mediante simbiogénesis y compuestos por células con núcleo), los animales (que se desarrollan todos a partir de embriones que surgen a su vez a partir de uniones óvulo-espermatozoide), los hongos (levaduras, setas y mohos que crecen de esporas fúngicas) y las plantas (que se desarrollan tanto a partir de esporas como, en ocasiones, a partir de embriones producidos sexualmente, incluso aunque no todas ellas fotosintetizan). A excepción de las bacterias, cada dedo de la mano de la vida tiene múltiples ancestros simbóticos microbianos.



Figura 4. La mano de los cinco reinos.

Cuando Ivan Wallin, que trabajaba en la Universidad de Columbia en los años veinte, propuso que los componentes celulares, los cloroplastos y las mitocondrias, se originaron como bacterias simbióticas, él y sus ideas fueron tajantemente rechazados. Su «teoría del simbiontismo» fue ridiculizada por la sociedad biológica seria y correcta, que le relegó al ostracismo. A los cuarenta años abandonó sus investigaciones de laboratorio sobre la simbiosis. Las bacterias eran agentes de enfermedad, no creadores de novedad evolutiva. Los microbios, insistían sus colegas, no abandonaron sus vidas como bacterias de vida libre para convertirse en partes cautivas de las células animales. Wallin se trasladó de Nueva York a Denver, donde su carrera como académico y profesor universitario prosperó durante otras cuatro décadas, pero nunca más volvió a argumentar en favor de los orígenes simbióticos de los orgánulos. Las bacterias eran plagas peligrosas; nadie escribía sobre ellas, ni siquiera en el contexto de la evolución de la

vida. Es más, los brazos de los árboles familiares se ramificaban. Nadie, excepto Merezhkovsky, argumentaba que las ramas se fusionaban.

Ahora sabemos que el trabajo del «excéntrico» Wallin está más en la onda del pensamiento de nuestro tiempo que en la del suyo. Uno de los motivos por los que sus afirmaciones no merecieron siquiera un examen crítico fue la existencia de un extendido compromiso con una rígida taxonomía. Todos los organismos percibidos como plantas o animales, o que se parecían a ellos, eran clasificados en consecuencia. Así sea. De hecho, de manera errónea pero reveladora, los microbios nadadores fueron incluidos en el reino animal. Cuando microbios extremadamente similares eran verdes y temporalmente inmóviles, eran considerados plantas. Una botánica, sólo porque pasara sus días en un departamento de botánica, clasificaría a todos los microbios y sus descendientes como plantas. Al otro lado del campus, un zoólogo incluiría seres muy similares en su reino animal. Las contradicciones proliferaron. Pequeños organismos difíciles de ver eran considerados plantas por los botánicos y animales por los zoólogos, incluso aunque fueran idénticos. Los microbiólogos (los bacteriólogos) y los micólogos (expertos en setas y mohos) sostuvieron batallas similares sobre las bacterias, las levaduras y otros hongos. Desgraciadamente, esta pintoresca confusión taxonómica todavía abunda.

Podemos perdonar a Antony van Leeuwenhoek (1632-1723), el inventor del microscopio, que llamara animáculos a las nuevas criaturas que descubrió. ¿Con qué otra cosa podía compararlas? Pero no tiene excusa que científicos de hoy en día retengán el término *protozoa* (que se traduce como «primeros animales») para referirse a criaturas que nadan cuyas características biológicas son radicalmente distintas de las de los animales. Algunos antiguos protozoos, microbios con núcleo, aunque son los ancestros de los animales también son los ancestros de las plantas, de los hongos y de todos los revoltosos prototistas. Por su parte, los protistas ancestrales, que nunca se desarrollan a partir de un óvulo, un espermatozoide o un embrión, no son animales. El grupo es increíblemente diverso. Siguen existiendo más de cincuenta linajes principales. Incluidos en ellos están las diatomeas, las algas pardas, los ciliados y otros grupos de

seres no tan conocidos que representan la «ubicuidad de la vida»^[21]. Ya sean amebas, ciliados, hipermastigóforos u otra cosa, no son animales.

También me estremezco cuando oigo a un biólogo utilizar la expresión «algas verde-azuladas». No existe tal cosa; estas maravillas verde-azuladas son en todos los sentidos bacterias fotosintéticas. Igual de irritante es «animal unicelular», que también es algo inexistente. Tampoco hay «plantas superiores» o «plantas multicelulares». Todos los animales y todas las plantas se desarrollan a partir de embriones, que son por definición multicelulares. Puesto que todas las plantas y los animales son multicelulares, el adjetivo es redundante. El término «protozoo» es un oxímoron y las farragosas frases «planta multicelular» y «animal multicelular» producen confusión.

El lenguaje puede confundir y engañar. Estos anticuados términos —«algas verde-azuladas», «protozoos», «animales superiores», «plantas inferiores» y muchos otros— permanecen en uso a pesar de su tendencia a propagar el malestar biológico y la ignorancia. El uso de estos insultos a los vivos beneficia a aquellas personas cuyos presupuestos, notas de clase y organización social dependen de su continuidad. Sugiero que una de las razones por las que las grandes ideas de Wallin fueron ignoradas o suscitaron oposición es que fue completamente malinterpretado por los muchos biólogos y profesores que refuerzan la idea falsa de la clasificación fija. Las bacterias, vistas sólo como causas de enfermedad, fueron entonces y son ahora consideradas casi siempre «agentes enemigos». Nótese cómo «esperamos vencerlas» utilizando las «armas» de la medicina moderna. Evidentemente, es ridículo describirlas ante todo en términos militares de combate. La mayoría de las bacterias no son más dañinas que el aire, y como al aire, tampoco podremos eliminarlas jamás de nuestros cuerpos y de nuestro entorno. Pero todavía muchos piensan erróneamente que cualquier bacteria, si estuviera presente, debería ser erradicada. Las bacterias, ahora y todavía más en tiempos de Wallin, deben ser derrotadas. ¿Cómo es posible que «habitén» un tejido sano? Los colegas de Wallin confundieron el mapa con el territorio.

Hoy, para la mayoría de la gente, la vida puede ser fácilmente dividida en tres categorías: las plantas (para alimento y decoración), los animales (nuestras mascotas, el marisco y nosotros mismos) y los gérmenes (que hay que eliminar). No puedo recordar cuándo me di cuenta de que esta idea es tan peligrosa como dominante; en realidad fue hace mucho tiempo. Yo intento reemplazar estas tonterías culturales y supersimplificadas con conceptos mucho más cercanos a las verdades científicas que tanto nos ha costado aprender. Ni las plantas ni los animales aparecieron sobre la Tierra hasta que las bacterias hubieron sufrido al menos 2000 millones de años de evolución social y química. De hecho, no sólo los animales y las plantas, también los hongos son nuevos en la Tierra. Ni planta ni animal es una categoría de clasificación eterna. Tampoco fue establecida de una vez y para siempre por una mente divina con inclinaciones platónicas. Además de todas las plantas y los animales que viven hoy en día, hay por lo menos otras tres formas de vida. Y aquí, en los no-plantas y no-animales, es donde descansa la verdadera biodiversidad.

¡Los animales y las plantas son mucho más parecidos entre sí que a todo el resto de tipos de vida terrestre! Gracias a la microscopía electrónica y a las nuevas formas de estudiar en detalle a todos los organismos que nos proporciona la actual biología molecular, entendemos mejor que nunca el variopinto surtido de la vida en la Tierra. Las moléculas de cadena larga como el ADN, el ácido ribonucleico (ARN) y las proteínas nos permiten comparar toda la vida utilizando una sola vara de medir. La gran división animal-vegetal que prevalecía desde antes de Aristóteles se está desmoronando. La revisión radical de nuestros sistemas de clasificación se impone. Los biólogos exploran los sorprendentes detalles de los microbios, incluida su dureza frente a la adversidad y su tendencia a sobrevivir estableciendo compromisos evolutivos simbióticos.

Mi trabajo sobre simbiontes microbianos me empujó a criticar y después revisar la clasificación biológica. Durante cerca de dos décadas, Karlene V. Schwartz y yo hemos recolectado información taxonómica de nuestros colegas y sus publicaciones científicas tratando de retejer los sistemas de clasificación contradictorios y biológicamente limitados en un

solo esquema consistente. Nuestra meta es una descripción que sea tan precisa y útil como sea posible y que refleje la historia evolutiva. Nuestra revisión moderna comprende una clasificación en dos niveles y cinco reinos. La mayor distinción en toda vida es aquella que separa a los procariotas del primer nivel —todas las bacterias compuestas de células «procarióticas» que no evolucionaron por simbiogénesis— del segundo nivel, que incluye a todos los eucariotas. Los eucariotas, los organismos con células nucleadas, han evolucionado todos por simbiogénesis. Este grupo incluye prototistas, hongos, plantas y animales. Este esquema, reproducido en la Figura 4, es cada vez más útil.

Ernst Haeckel, un ecléctico científico alemán, creó respetuosamente un reino para los protistas y lo añadió al de las plantas y el de los animales. Pero fue Antony van Leeuwenhoek (1632-1723), nacido más de doscientos años antes que Haeckel, quien descubrió el mundo microbiano. Mercader de telas nacido en Delft, Holanda, Van Leeuwenhoek se pasó la vida, como yo, examinando el microcosmos; él, sin embargo, construía sus propios microscopios. En holandés coloquial del siglo XVII describió la exuberante vida microbiana de los charcos, el agua estancada, la saliva de bellas jóvenes y la diarrea de los borrachos. Sus descripciones fueron finalmente publicadas en Londres en forma de cartas a la Royal Society. Mucho más tarde el concepto darwiniano de la evolución llevó a los intelectuales europeos a buscar los ancestros comunes de la vida. Fue entonces cuando los diminutos seres de Leeuwenhoek se convirtieron en algo más que «monstruos de feria» que eran exhibidos por los naturalistas aficionados utilizando una modificación dieciochesca del microscopio del holandés. Los microscopistas percibían cada vez más a los microbios como las formas ancestrales de la vida más grande.

Los microbios, por supuesto, no fueron añadidos a las categorías taxonómicas formales hasta mucho tiempo después de que fueran descubiertos. Tras el descubrimiento de Louis Pasteur de las nefastas bacterias de las enfermedades, los organismos más pequeños fueron bautizados y encajados a la fuerza en un esquema de clasificación.

Mucho antes, en el siglo III a. C, Aristóteles clasificó alrededor de quinientas especies animales. Él, que sólo podía servirse de su aguda vista, no observó evidentemente ningún microbio y consideró que las categorías de la vida eran fijas e inmutables. Sin embargo, algunas de las clasificaciones de Aristóteles se corresponden con nuestras clasificaciones modernas; por ejemplo los delfines, que él agrupó con los mamíferos terrestres en vez de con los peces. Más tarde, Plinio, un académico romano (23-79 d. C), intentó catalogar en una *Historia Natural* de treinta y siete volúmenes a todos los seres vivos de los que se tenía conocimiento. Basándose en múltiples fuentes de información, Plinio incluyó en su estudio unicornios, caballos voladores y sirenas. Durante la Edad Media y el Renacimiento, debido a que las descripciones de seres estaban incluidas en los relatos de viajes, se escribieron bestiarios profusamente ilustrados. Los esqueletos de elefante eran tomados como la prueba de la existencia de monstruosos humanoides y los dientes fósiles de tiburones se interpretaban como los restos de dragones a los que se había dado muerte.

La taxonomía se hizo más fiable cuando en 1686 un inglés, John Ray (1627-1705), publicó un compendio de miles de especies diferentes de plantas. En 1693 apareció su clasificación de animales, ordenados de acuerdo con las diferencias y similitudes de sus cuerpos: pezuñas, garras, dientes y otras características. Reflejando una creciente desconfianza en las fábulas, los rumores y las fantasías, que los bestiarios recogían como si se tratara de hechos, Ray afirmó que los fósiles eran los restos de plantas y animales que ya no existían.

El esquema de clasificación preevolutivo más completo fue publicado por el famoso botánico de Uppsala Carolus von Linné (1707-1778). Lineo, utilizando la versión latinizada de su nombre, inventó lo que llegó a ser conocido como nomenclatura binómica. Dio a cada una de las formas de vida dos nombres, derivados normalmente del latín o del griego. El «nombre» expresaba el grupo al cual pertenecía el organismo, su género, y el «apellido» su especie. Estos nombres eran entonces, y todavía lo son, escritos en cursiva, con la primera letra del nombre genérico en mayúscula. Hoy en día el sistema lineano es crucial para el conocimiento biológico.

Internacionalmente todos los biólogos reconocen estos dos nombres como género y especie. Incluso los libros japoneses y chinos, y los textos rusos que utilizan el alfabeto cirílico, escriben los nombres de especie y género en latín y en cursiva. Sea cual sea su idioma nativo o su región de origen, todos los autores y naturalistas saben que los nombres lineanos se refieren a las mismas especies de organismos. El género es el taxón superior y más inclusivo. La especie es la agrupación más pequeña y menos inclusiva.

Todos los perros, por ejemplo, pertenecen al género *Canis*. La especie de los perros domésticos es *familiaris*. Los lobos son *Canis lupus* y los coyotes *Canis latrans*. Los humanos somos *Homo sapiens*. Lineo aplicó esta clasificación sólo a nuestros cuerpos; él consideraba que nuestras almas estaban fuera del adecuado esquema clasificable de la naturaleza. En la actualidad los otros únicos miembros del género *Homo* son fósiles de humanos extinguidos, como *Homo habilis*, *Homo erectus*, *Homo sapiens neandertalensis* y el recientemente descubierto *Homo sagittarius*.

Lineo también agrupó a los géneros en taxones superiores llamados órdenes, y a los órdenes en clases. El anatomista francés Georges Cuvier (1796-1832) englobó después a los órdenes en «ramificaciones», agrupaciones más grandes que corresponden a los *phyla* (o divisiones) actuales. Cuvier, cuyo trabajo fue enormemente importante para la colección del Museo de Historia Natural de París, extendió la clasificación lineana a los fósiles. Tanto Cuvier como Lineo creían que todas las especies eran formas eternamente separadas creadas por un Dios omnipotente. Cuvier consideraba los fósiles como la prueba de la vida pasada que había desaparecido con el Diluvio y otras catástrofes bíblicas. De esta manera admitía que algunos animales se habían extinguido, pero no hallaba prueba alguna de la aparición de nuevas formas de vida desde la creación divina del mundo. Aunque no eran evolucionistas, Lineo y Cuvier, por su atenta mirada a las detalladas relaciones entre los vivos, fueron buenos académicos. Sus trabajos tienen un valor perdurable. Reforzaron lo que se convirtió en la línea principal del pensamiento evolutivo subsiguiente de los siglos XIX y XX.

Ernst Haeckel (1834-1919), el brillante investigador alemán del mundo natural, fue uno de los primeros en empuñar su lanza en favor de la evolución de Darwin. Vio que el concepto de evolución suponía un problema para la antigua dicotomía animal-o-planta. Haeckel no estaba en lo cierto en todas sus afirmaciones: creía que la vida, incluso hoy en día, evolucionaba a partir de la no-vida. Nuestros ancestros últimos —algunos, afirmaba, todavía moradores del fondo del mar— fueron extraños seres a partir de los cuales se originaron las plantas y los animales. Aseguraba que nuestros ancestros no eran ni lo uno ni lo otro.

Haeckel amplió, popularizó y aplicó sistemáticamente las ideas de la evolución de Darwin. Describió muchos seres nuevos. Realizó ilustraciones de bellos seres que flotaban en el océano: el plancton. Fue el primer científico que recolocó formalmente a los diminutos moradores marinos, los radiolarios y los foraminíferos —que no son ni plantas ni animales—, en su propio reino. Haeckel les otorgó con valentía el nombre de «reino mónera», que significa unidades primitivas. Las fronteras del reino mónera de Haeckel fluctuaron a lo largo de su vida. A veces incluía a las amebas y a los hongos mucosos^[22], ahora clasificados con los protoctistas. En algunos de sus trabajos incluía además en su mónera a las esponjas, ahora consideradas animales. A lo largo de las numerosas ediciones de sus numerosos libros, Haeckel se mantuvo firme en su rechazo del antiguo sistema de clasificación en dos reinos. Pensaba, como yo, que la rígida dicotomía planta-animal contradecía los nuevos descubrimientos e interfería en la comprensión de la historia evolutiva de la vida. A diferencia de Lineo, que clasificó diez mil especies de creación divina, Haeckel era un evolucionista darwiniano.

Un profesor de biología de Sacramento, California, Herbert F. Copeland (1902-1968), amplió el esquema de Haeckel. En 1956 publicó un libro muy poco conocido en el que dividía las móneras de Haeckel en dos reinos^[23]. Reservó la categoría mónera para las bacterias, teniendo en cuenta que sus células carecían de núcleo. El segundo reino, el protoctista, lo tomó de una obra de 1860 del naturalista británico John Hogg. Copeland situó a todos los microbios cuyas células poseen núcleo en el reino protoctista. Incluyó a

los protozoos tradicionales, a los mohos acuáticos que se reproducen mediante la formación de células que nadan parecidas a los espermatozoides, y a las algas de todas clases en el reino protocista de Hogg. Decidió unilateralmente incluir en los protocistas a muchos otros extraños grupos de microorganismos nucleados o formas de vida viscosas y más grandes. No colaboró con nadie y no pidió permiso a nadie para cambiar las clasificaciones de forma que encajaran en su esquema. La decisión más importante que tomó fue incluir a los mohos, las levaduras, las setas y todos los demás hongos en el *phylum Inophyta* de su versión del reino protocista.

Tres años más tarde, un catedrático de la Universidad de Cornell, Robert H. Whittaker (1924-1980), desarrolló cuidadosamente la clarividente, pero virtualmente ignorada, taxonomía de cuatro reinos de Copeland. Whittaker, que fundó el campo de la ecología de comunidades en Norteamérica, había estudiado los pinares de arenales de Nueva Jersey durante muchos años^[24]. Se dio cuenta de que los hongos de estos pinares, principalmente setas conectadas a las raíces y nunca fotosintéticas, eran tan diferentes de las plantas que pertenecían a un reino separado. Whittaker estableció cinco reinos: hongos, plantas, animales, los protocistas de Hogg (presentados como los protistas, los miembros más pequeños, que no pertenecen a ningún otro reino) y las móneras de Haeckel (las bacterias). Whittaker, como Copeland, se dio cuenta de que los primeros cuatro grupos son eucariotas: sus células siempre contienen núcleo. Sólo los organismos del último reino carecen de núcleo y por lo tanto son procariotas. Los miembros de este grupo, todos ellos bacterias, permanecieron en el mónera de Haeckel después de que Copeland eliminara de él a todos los seres nucleados.

Como Copeland y Whittaker, Karlene Schwartz y yo nos sentíamos frustradas por las contradicciones, inconsistencias y confusiones de nuestros colegas. Nos resultaba difícil enseñar a nuestros estudiantes las absurdas inconsistencias de las clasificaciones botánica y zoológica. La botánica era, y con frecuencia todavía lo es, irreconciliable con la zoológica. Necesitábamos utilizar y enseñar una taxonomía consistente y comprensible

que tuviera sentido. Hemos trabajado durante años para recopilar el trabajo de muchos académicos e investigadores: botánicos, zoólogos, microbiólogos, protoctistólogos, micólogos, algólogos (=ficólogos) y otros. Queremos un esquema que podamos enseñar, un sistema evolutivo de clasificación que refleje la morfología, el metabolismo, la genética y la biología del desarrollo. Observamos lo evidente: aunque las plantas y los animales tienen distintas estrategias de supervivencia, comparten grandes similitudes estructurales. Ambos están hechos de células que contienen cromosomas situados dentro de un núcleo limitado por una membrana. Ambos producen óvulo, espermatozoide y embrión. Desde la primera vez que leímos sobre él en la revista *Science* en 1969^[25], el sistema de cinco reinos de Whittaker nos pareció la mejor representación de los agrupamientos evolutivos de la vasta diversidad de la vida. Pero toda la vida de gran tamaño tiene ancestros directos entre los microbios: el kelp gigante vino de diminutas algas doradas, los hongos mucosos evolucionaron a partir de las amebas y los ancestros de las grandes algas verdes marinas fueron microscópicas algas clorofítas parecidas a muchas de las que aún viven. No se puede separar a los grandes organismos de sus diminutos y cercanos parientes. De esta manera, siguiendo a Copeland, Karlene y yo resucitamos el inclusivo término de John Hogg «protoctista»; nosotras lo utilizamos en una versión ampliada y evolutivamente robusta del reino protista de Whittaker. Conservamos el término informal «protista» para referirnos a miembros pequeños de los protoctistas (véase Figura 5). Todos los protoctistas evolucionaron, en último término, a partir de simbiosis bacterianas. Algunos protistas son unicelulares; otros tienen un número pequeño de células. Cualquier ameba de vida libre, por ejemplo, es un protista. Las amebas, los ciliados, las células algales, junto con las algas marinas y las formas coloniales de amebas —los hongos mucosos—, son todos el reino protoctista. *Proto-* viene del griego «primero», como en *protozoa*. Pero a diferencia de «protozoo», los términos «protista» y «protoctista» (que vienen de *proto-* y *ctista*, que significa «primeros organismos establecidos») no tienen ninguna connotación zoológica. Yo llamo a los protoctistas «don-nadies acuáticos». Algunos viven en charcos,

algunos en agujeros de los árboles, otros en lagos; y hay aún otros que flotan en el océano. Aunque todos ellos son seres acuáticos, ninguno es ni planta ni animal. Aunque los animales evolucionaron a partir de algunos prototistas (los zoomastigóforos), las plantas a partir de otros (las clorofitas), y los hongos de otros (los quítridos), ningún prototista es en su esencia ni un animal, ni una planta ni un hongo^[26].

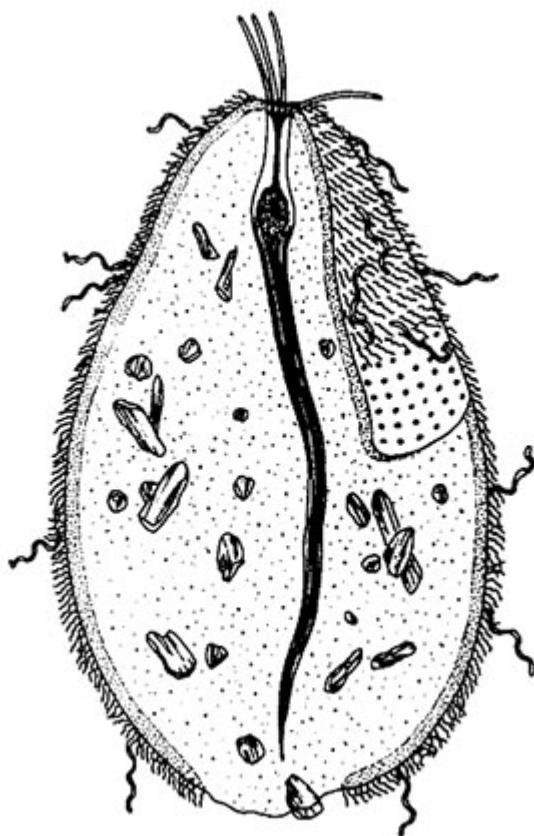


Figura 5. *Mixotricha paradoxa*, un prototista: el ejemplo de un individuo compuesto por al menos cinco clases de organismos.

Estamos convencidas de que los virus no pertenecen a ninguno de los cinco reinos. No están vivos puesto que fuera de las células vivas no hacen nada, nunca. Los virus necesitan el metabolismo de la célula viva porque carecen de los requisitos para generar el suyo. El metabolismo, la incesante química del automantenimiento, es un rasgo esencial de la vida. Los virus carecen de él. Mediante un metabolismo constante, mediante el flujo de

sustancias químicas y de energía, la vida se produce, se repara y se perpetúa continuamente. Sólo las células y los organismos compuestos de células metabolizan. Aunque sea capaz de invadir plantas, animales, hongos o prototistas, fuera de la membrana de una célula viva cualquier virus es inerte. Sin embargo, los virus son importantes para el relato de la vida sobre la Tierra. Puesto que dependen del metabolismo ajeno, es muy probable que los primeros virus evolucionaran a partir de bacterias. Probablemente empezaron como porciones irradiadas de células bacterianas que vivían expuestas a la luz del sol. Algunos virus, bastante complejos en su estructura, bajo el microscopio electrónico pueden parecer robots en miniatura o agujas hipodérmicas. Cómo evolucionaron formas tan complejas careciendo de un metabolismo propio es una pregunta que no pretendo contestar. Sin embargo, merece la pena mencionar la idea de que los virus no son más «gérmenes» y «enemigos» que las bacterias o las células humanas. Los virus actuales difunden genes entre las bacterias, las células humanas y otras células, como siempre han hecho. Como los simbiontes bacterianos, los virus son una fuente de variación evolutiva. Algunas poblaciones de organismos infectados por virus son seleccionadas naturalmente.

Los virus, como todas las formas de vida basadas en células, dan problemas cuando abarrotan sus hábitats. Se culpa al famoso Ébola y a otros virus de traer el desastre a ciertas poblaciones. La proliferación de los recursos, ya sean virales u otros, tiende a ser debida a un debilitamiento y perturbación del ecosistema. No podemos ser curados de nuestros virus más de lo que podemos prescindir de nuestros lóbulos frontales del cerebro: nosotros somos nuestros virus.

La taxonomía de cinco reinos y dos partes (procariotas frente a eucariotas) refleja fielmente la historia evolutiva. Por eso es infinitamente mejor que la vieja y confusa dicotomía planta-animal. Las bacterias evolucionaron en primer lugar. Se ramificaron dando muchas formas diferentes: rojas, púrpuras y verdes; fermentadoras, fotosintéticas y respiradoras; productoras de azufre y de oxígeno; ovales, con forma de anguila y con forma de varilla. Incluso evolucionaron grandes bacterias con

forma de árbol. Pero las bacterias no sólo se diversificaron, también invadieron y llegaron a vivir las unas dentro de las otras. Se aglomeraron alrededor de las fuentes de alimento, que incluían a otras bacterias. Carentes de sistema inmunológico o de barreras externas rígidas, se fusionaron internamente tratando de alimentarse y, con o sin sus virus, intercambiaron genes. Los supervivientes de las agresiones frustradas formaron treguas incómodas. Fusionadas, las bacterias anteriormente independientes se convirtieron en nuevos tipos de células complejas. Estos complejos se transformaron en protistas cuando comenzó la especiación. Los diminutos protistas y sus colonias produjeron un enorme y diverso grupo de organismos. Hoy en día hay alrededor de 250 000 especies de prototistas. Muchos más se han extinguido. Sus pequeños restos, los microfósiles, nos informan de su anterior existencia.

Los prototistas son microorganismos nucleados que sufrieron muchos giros evolutivos, incluyendo la alternancia de unicélulas para el apareamiento y generaciones formadoras de adultos. Con el tiempo, los descendientes de algunos prototistas se convirtieron en animales y plantas con reproducción sexual. La coevolución simbiótica bacteriana de nuestros ancestros condujo a los prototistas que nos precedieron. Cada uno de nosotros es una gigantesca colonia de microorganismos. Los antiguos prototistas son ahora animales elocuentemente orquestados con elaborados tejidos y órganos. Karlene y yo tenemos la impresión de que nuestra taxonomía de cinco reinos de Whittaker modificada refleja fielmente la evolución de los prototistas a partir de bacterias simbióticas, y de los animales, las plantas y los hongos a partir de los prototistas^[27].

Carl R. Woese, de la Universidad de Illinois, en Urbana, y sus colegas han propuesto una taxonomía radicalmente diferente de tres partes, que consisten en Archaea (llamadas al principio arqueobacterias), Eubacteria (todas las demás bacterias) y Eukarya (todas las formas de vida nucleadas). Woese llama a estas agrupaciones «dominios». Su clasificación de los Eukarya, todos organismos nucleados, es la misma que la nuestra. Aun así, él concede a Eukarya el mismo estatus que a cada uno de los dos restantes grupos de bacterias. Para Woese, los cuatro reinos eucarióticos distintivos

(protoctistas, hongos, animales y plantas) están aglutinados juntos en uno solo. Desde mi punto de vista, Woese más que iluminar oscurece la distinción crítica entre los procariotas y los eucariotas, entre la vida simbiogenética y la no simbiogenética.

Los otros dos dominios de Woese, como sus nombres sugieren, son bacterianos. Comparando el ARN, una de las moléculas largas y cruciales que está presente en todas las formas de vida, Woese utiliza las diferencias en la secuencia —el orden de las bases químicas del ARN— para clasificar a todos los organismos. Después de recopilar datos de cerca de un millar de formas de vida, Woese clasifica a los diferentes procariotas bien como Archaea, bien como Eubacteria. Los miembros del dominio Archaea de Woese incluyen algunas halobacterias, procariotas que requieren agua salina, y las bacterias más acidófilas, las que viven en los manantiales calientes sulfurados. También forman parte de Archaea todas las bacterias que producen gas metano. El nombre *Archaea*, que viene del griego, significa «viejo» e implica que ellas fueron las primeras en aparecer sobre la Tierra. Todas las demás bacterias son clasificadas por Woese como Eubacteria («bacterias verdaderas»). La distinción Archaea-Eubacteria, determinada principalmente por el análisis de la secuencia de genes, necesita de una extraordinaria tecnología para ser corroborada. A pesar de sus diferencias, tanto el sistema de tres dominios de Woese como el sistema de cinco reinos son coherentes con una visión simbiótica de la evolución. Ambos superan en mucho al anacronismo planta-frente-a-animal.

La taxonomía de tres dominios de Woese da más importancia a las diferencias moleculares entre las dos clases de bacterias que a las que existen entre un champiñón y un alce. Para mí esto es absurdo. El mejor evolucionista del mundo en la actualidad, Ernst Mayr, de la Universidad de Harvard, está completamente de acuerdo con nosotras. «Este sistema de Woese —me escribió recientemente— se está colando en todos los libros de texto de biología. Creo que tendré que quejarme un poco». Mayr ha publicado un artículo técnico acerca de las similitudes entre las arqueobacterias y otras bacterias y las diferencias entre todas las bacterias y el resto de la vida, la vida nucleada.

Aun siendo, como soy, bacteriófila creo que nuestro esquema en dos niveles (Prokarya, Eukarya) y cinco reinos, publicado en 1998 y recientemente modificado, es mucho mejor que la clasificación en tres dominios. Se dota a la principal característica distintiva de todas las formas de vida, células no simbiogenéticas (Prokarya) frente a células simbiogenéticas (Eukarya), del estatus superior. Después se presta atención a la manera en la que se desarrollan los organismos: a partir de esporas (hongos), a partir de un embrión rodeado de tejido materno (plantas), a partir de un embrión blástula (animales) o a partir de ninguno de los anteriores (protoctistas).

Como Mayr, veo muchos problemas en el sistema menos biológico de Woese. El criterio principal de Woese para distinguir toda la vida es un solo gen, un determinado trozo de ADN que codifica una de las moléculas de ARN del organismo. El ARN codificado por este ADN es una parte de la subunidad pequeña de una partícula celular, el ribosoma. Woese sólo utiliza este gen, incluso aunque las bacterias pequeñas tengan alrededor de cinco mil genes en sus células. Yo pienso que esto podría crear confusión. Los organismos deben ser clasificados sobre la base de sus biologías completas. Segundo, hay por lo menos un protoctista (*Plasmodium*, el parásito de la malaria) que cambia la secuencia de este gen de ARN en distintos momentos de su historia vital. Si el ARN de un microorganismo puede cambiar en tan sólo unas pocas horas, la secuencia del ARN no es probablemente la mejor manera de definir al más grande de todos los grupos. El taxón más inclusivo al cual pertenece un individuo necesita estar basado en mucho más. La mayoría de la gente puede distinguir fácilmente entre los cuatro reinos de organismos de gran tamaño si los ve, pero pocos de nosotros tenemos acceso a los métodos de secuenciación de genes de Woese. Es más, un sistema en el que las plantas, los hongos, los protoctistas y los animales están fusionados en un gran grupo oculta un conocimiento que ha costado mucho esfuerzo obtener. Un esquema taxonómico debe ser un sistema de recuperación de información.

Tengo otras objeciones a los tres dominios de Woese. Los procariotas, a diferencia de los animales, las plantas y otros eucariotas, transmiten con

frecuencia sus genes de uno en uno. Las arqueobacterias y las eubacterias intercambian genes las unas con las otras. Estos diminutos organismos son muy parecidos y pertenecen todos a un imperio, reino, dominio, o como se quiera llamar al taxón superior. Además de las moléculas y los compuestos químicos internos, debemos tener en cuenta la forma del cuerpo, el comportamiento y el desarrollo de cualquier forma de vida. Aunque la madera de un platanero y la piel de un perro tuvieran secuencias de genes idénticas, todavía clasificaríamos al perro, no junto al plátano, sino con los lobos y los chacales. La generosa tradición taxonómica que ha llevado a los botánicos a clasificar las plantas basándose en las partes de las flores es enriquecida, y no sustituida, por el nuevo talento que nos proporciona la biología molecular. Aunque aplaudo la enorme contribución de Woese a la clasificación universal, pienso que su esquema de tres dominios va demasiado lejos.

El movimiento hacia sistemas de clasificación basados en la evolución ha tomado el poder. Las bacterias evolucionaron primero y se diversificaron mediante ramificación. Después, mediante simbiogénesis bacteriana, las ramas se fusionaron a medida que emergían los protoctistas. Algunos protoctistas evolucionaron a partir de un rico depósito ancestral para dar hongos, y otros para dar animales o plantas. Los antiguos grupos permanecen y se diversifican. Las nuevas formas podrían resultar transitorias o estables. Mientras que todas las especies tienden a extinguirse, las grandes agrupaciones, ya sean llamadas dominios, reinos u otra cosa, perduran.

Cualquier esquema taxonómico tiene problemas. Tendemos a poner etiquetas a las cosas y a rechazar cualquier cambio una vez que las hemos asignado a una categoría. Nuestras clasificaciones nos ciegan ante lo salvaje de la organización natural y nos proporcionan cajas conceptuales en las cuales encajar nuestras ideas preconcebidas. Deberían reflejar nuestro estudio de la naturaleza. El sistema de dos niveles y cinco reinos siempre necesitará revisión. Cualesquiera que sean sus dificultades, no perpetúa los arcaicos errores de la dicotomía «animal frente a vegetal». Podemos

agrupar la vida en tres o en cinco o en un millón de categorías, pero la vida misma nos eludirá.

5. LA VIDA A PARTIR DE LA ESCORIA

¡Qué misterio colma un pozo!
Pues vive el agua tan lejos—...
¡Como mirar cuando quieras
En el rostro de un abismo! (1400)^[VI]

Ya sean bacteriales o nucleadas, las células son las unidades de la vida. Todos los organismos visibles están compuestos por células nucleadas y la primera célula con núcleo evolucionó, como hemos visto, por fusiones de células bacterianas. Pero ¿cómo evolucionó esa escurridiza unidad, el progenitor de toda la vida terrestre? ¿Qué da cuenta del comienzo de la urcélula^[28]? ¿Cómo se originó la primera célula bacteriana? Esta pregunta equivale exactamente a la de: «¿Cómo se originó la vida?». Para poder apreciar la SET, que sólo recombinan, fusionan e integran bacterias extremadamente diversas, primero tenemos que comprender de dónde vienen esas bacterias tan diversas. En resumen, necesitamos intentar comprender la vida a partir de la escoria.

Buscando el escenario ecológico de las células más tempranas sobre la Tierra, cada pocos años mis estudiantes y yo hacemos una peregrinación a la bahía de San Quintín, en Baja California Norte, México. Seguimos las variables orillas de la laguna Figueroa, un complejo lacustre bordeado por salinas. Allí encontramos sedimentos laminados y con rayas brillantes bajo los cuales subyace un barro gelatinoso. Estas coloridas extensiones costeras, llamadas «tapetes microbianos», me cautivan; un paisaje vivo justo donde el mar se encuentra con la tierra y avanza y retrocede sobre ella. Afortunadamente para nuestro estudio, este escenario es inhóspito para la gran mayoría de formas de vida de gran tamaño, incluyendo la humana.

Pongo mis manos en el lodo de los fragantes tejidos microbianos y puedo oler los gases que están siendo intercambiados. Aquí, como en la esfera humana, pero ni por mandato ni por necesidad, la muerte es parte de la vida. El potencial de crecimiento de la población es sucesivamente puesto a prueba y realizado. Estas comunidades costeras han persistido durante casi tres mil millones de años. Muchos de sus habitantes mueren diariamente pero la comunidad misma nunca crece por encima de sus límites. Éste es un Edén evolutivo más primario que los pastos más verdes. Aquí, en este tejido terráqueo, los animales y las plantas están completamente ausentes. Incluso los protistas y los hongos son escasos. En él prosperan principalmente las bacterias. De pie sobre el tapete bacteriano me siento privilegiada. Me deleito en el paisaje, excitada por haber escapado de la descontrolada expansión urbana producto de la hiperactividad humana y tonificada por la libertad de contemplar los orígenes más remotos de la vida.

El origen de la vida es un concepto mítico, y no porque sea falso sino más bien porque causa una profunda sensación de misterio. Incluso los científicos necesitan narrar e integrar sus observaciones dentro de relatos del origen. ¿Cómo comenzó la vida más temprana, la primera célula bacteriana? ¿Cómo se diferenciaron las ur-bacterias del entorno del cual se supone que surgieron? Tales preguntas no sólo entran dentro de la competencia de la investigación científica sino que una respuesta adecuada a ellas es esencial para la SET. Debemos saber cómo empezaron las bacterias y en qué se convirtieron antes de que podamos comprender cómo se fusionaron bacterias separadas para crear nuestras células. Las respuestas al problema del origen de la vida están tejidas del trabajo de toda una vida de académicos de muchas naciones. El relato científico de la primera vida sobre la Tierra es el menos provinciano de los mitos del origen del mundo; está libremente a disposición de todos los que quieran aprender acerca de él.

Las propiedades de la vida bacteriana mínima, la primera vida, pueden ser inferidas utilizando varios enfoques. Primero, se comparan todos los seres vivos para ver lo que tienen en común. De ello se deduce qué aspectos comunes y absolutamente imprescindibles para todas las formas de vida han

persistido desde nuestro ancestro bacteriano más temprano. La cadena de la vida no se ha roto ni una sola vez desde su formación.

Un segundo enfoque hacia los orígenes es a través de la paleobiología: el estudio de los microfósiles, los restos de la vida temprana. A algunos microfósiles se les puede asignar una edad. Pueden ser datados mediante la medida directa de la edad de las rocas volcánicas que los rodean y a las cuales están asociados.

Una tercera vía para iluminar los orígenes de la vida es intentar rehacer una célula; es decir, tratar de imitar químicamente en el laboratorio el estado ancestral mínimo de la naturaleza. De esta forma se han conseguido sintetizar algunos componentes de la vida a partir de componentes más simples, pero hasta ahora no hay nada que se asemeje a una recreación de laboratorio de la célula bacteriana. Evidentemente, aunque lo consiguiéramos no podríamos concluir que nuestra torpe imitación fue la manera real en la que las células se originaron por primera vez.

Mediante una combinación de métodos, he llegado a estar de acuerdo con otros científicos acerca del argumento más probable e investigable para el origen de la primera célula sobre la Tierra. Antes de las células había sistemas parecidos a ellas. Hoy en día, ningún trozo de ADN, ningún gen, se replica fuera de la célula de la que forma parte. Tampoco puede ningún virus hacer más copias de sí mismo sin habitar una célula viva. Es la célula bacteriana, en la actualidad la unidad más pequeña de vida, automantenimiento y reproducción, por donde debemos comenzar.

Nadie pretende haber resuelto el problema del origen de la vida. Sin embargo, aunque no podamos crear células a partir de compuestos químicos, cuando se agitan el aceite y el agua se forman recintos membranosos parecidos a células tan naturalmente como las burbujas. En los más tempranos días de la todavía inerte Tierra, tales recintos-burbuja separaban el interior del exterior. Como argumenta Harold J. Morowitz, distinguido catedrático de la Universidad George Mason, en Fairfax (Virginia), y director del Instituto Krasnow para el Estudio de la Evolución de la Consciencia, en su divertido libro sobre la mayonesa^[29], pensamos que la pre-vida, con una fuente adecuada de energía dentro de una

membrana grasa, creció en complejidad química. Estas bolsas lipídicas crecieron y desarrollaron automantenimiento. Mediante el intercambio de partes mantuvieron su estructura de una manera cada vez más fiel. Evidentemente la energía era necesaria. Al principio, la energía solar pasó probablemente a través de las gotitas; el flujo controlado de energía condujo a la individualidad que después se convirtió en la vida celular^[30]. Por definición, las más estables de estas gotitas sobrevivieron más tiempo y finalmente, por azar, retuvieron su forma mediante un incesante intercambio de partes con su entorno. Después de una gran dosis de evolución metabólica, que yo creo que tuvo lugar dentro de la membrana grasa dotada de automantenimiento, algunas —aquellas que contenían fosfatos y nucleósidos con fosfato unido a ellos— adquirieron la capacidad para replicarse con mayor o menor exactitud.

De cómo surgiera la primera bacteria sólo podemos hacer conjeturas. Aun así los fósiles más antiguos que tenemos hoy en día se interpretan como restos de bacterias fósiles. Probablemente los mejor conservados vienen del sur de África y tienen cerca de 3500 millones de años de antigüedad. La misma existencia de estas microesferas de Swazilandia, como son denominadas, nos muestra que la vida ya estaba desarrollándose, reproduciéndose y creciendo sólo 1100 millones de años después de que la Tierra se originara como un cuerpo rocoso con atmósfera y océano. Hoy en día nadie duda de que la vida sobre este planeta es muy antigua. Puesto que al propio universo, que explotó a la existencia a partir de la «singularidad» del Big Bang, normalmente se le atribuye una edad que varía entre tan sólo 12 000 y 15 000 millones de años, la ocupación de más de mil millones de años de la vida sobre la Tierra sugiere la presencia de vida durante un cuarto de la existencia del universo. Tampoco duda ya nadie de que la vida más temprana no fue ni animal ni vegetal.

Desde el origen del universo, hemos estado presentes en otro sentido, en forma de la sustancia material de la cual están hechos todos los seres vivos. La materia corporal de todas las formas de vida, incluyendo por supuesto la de los mamíferos como nosotros, se puede rastrear hasta el carbono, el

nitrógeno, el oxígeno y otros elementos que se produjeron en las explosiones estelares de las supernovas.

Al principio podría parecer inverosímil que toda la vida que existe hoy sobre la Tierra, los habitantes de las ciudades, las junglas, los océanos, los bosques y los pastizales, sea la progenie de una bacteria arcaica. ¿Cómo podrían una o unas cuantas bacterias haber sido tan prodigiosas? Pero dese cuenta el lector de que él, él mismo, fue una vez una única célula: el óvulo fertilizado, el zigoto, que se reprodujo por división hasta convertirse en un embrión en el útero de su madre. Después se transformó en un recién nacido que lloraba en sus brazos. Si en nueve meses un único óvulo fertilizado puede convertirse en un humano, aunque sea un humano rechoncho, indefenso y descoordinado, ¿no es fácilmente concebible que todas las formas de vida actuales aparecieran hace alrededor de 3000 millones de años a partir de una única bacteria?

Las células más listas, las de las más diminutas bacterias, con un diámetro poco más o menos de una diezmillonésima de metro, metabolizan constantemente. Esto significa que pasan sin interrupción por cientos de transformaciones químicas. Están por completo vivas. Trabajos recientes han revelado que las más diminutas y más sencillas bacterias se parecen mucho a nosotros. Metabolizan sin parar utilizando los mismos componentes: proteínas, grasas, vitaminas, ácidos nucleicos, azúcares y otros carbohidratos. Es cierto que incluso la bacteria más simple es en extremo compleja. Aun así su maquinaria interna todavía se asemeja a la de la vida más grande. Ya se ha secuenciado todo el ADN de una de las células más sencillas, la bacteria llamada *Mycoplasma genitalium*. Esto significa que conocemos sus genes a la perfección. Cuanto más de cerca estudiamos las secuencias de genes y el metabolismo más conscientes somos de que desde su origen toda la vida ha sido similar a su hermana, toda la vida restante. *Mycoplasma*, como todas las demás bacterias, nunca cesa de utilizar energía para obtener alimento; equilibra sus sales, forma ADN, ARN y proteínas, y convierte un compuesto químico en otro para mantenerse en funcionamiento. Ellas se diferencian enfáticamente de lo que les rodea. La célula bacteriana más sencilla sobre la Tierra temprana, como

las más pequeñas de hoy en día, ya tenía integridad. La más diminuta primera bacteria era ya tan complicada que sir Francis Crick, uno de los descubridores de la estructura del ADN, hizo una sorprendente afirmación. Crick escribió un libro muy influyente, *Life Itself (La vida misma)*, en el que argumentaba que la vida, debido a su sobrecogedora complejidad, tenía que proceder del espacio exterior^[31]. Sugería que la vida bacteriana fue enviada por una civilización extraterrestre con la intención de cultivar el planeta Tierra. Crick, con una insondable seriedad, afirma que exactamente igual que un jardinero humano introduce semillas en el suelo de su huerto, hace eones fueron plantados propágulos en nuestro planeta. Esta idea, llamada panespermia dirigida o pangénesis y mantenida durante siglos, de que la vida vino en forma de semilla desde el espacio exterior, me parece que hunde sus raíces en la ignorancia de la evolución sobre la Tierra.

Transferir el problema del origen de la vida al espacio exterior es intelectualmente insatisfactorio. ¿Por qué habría sido más fácil para la vida originarse en cualquier otro lado que en la Tierra? Donde quiera que la vida celular empezara tuvo que enfrentarse a los mismos problemas del origen. La idea de la generación espontánea no muestra el origen de las especies sino el origen de lo engañoso.

Durante generaciones, los europeos creyeron que la vida aparecía espontáneamente en la suciedad y el estiércol. Se pensaba que la carne podrida generaba gusanos; que de los trapos viejos nacían ratones. Sin embargo, una observación y experimentación más detenida reveló que había estados intermedios. Los gusanos, como sabemos, no surgen de los revoltijos por compleja que sea su química. Crecen a partir de los huevos fertilizados por espermatozoides que ponen las moscas. Aun así, en la mente de los predecesores de Louis Pasteur, los gusanos que se retorcían en la carne maloliente significaban que la vida florecía de la propia podredumbre. Alrededor de 1860 Pasteur expuso un extracto de carne hervida al aire. Utilizó un matraz alargado cuyo cuello estrecho y doblado hacia abajo admitía aire pero no bacterias o cualquier otro propágulo. Otro matraz completamente abierto se pudrió por la acción de bacterias y hongos en unos pocos días. El «control» de Pasteur, el matraz cerrado con su boca

hacia abajo, nunca ha llegado a estropearse. El caldo no contaminado todavía está expuesto en el Instituto Pasteur de París. Pasteur demostró de forma espectacular que los últimos creyentes en la generación espontánea estaban equivocados. Los cachorros vienen de los perros y las perras; los niños vienen de los hombres y las mujeres; las moscas vienen de los gusanos; los ratones vienen de madres ratonas inseminadas. Como todos ellos, los microbios vienen de microbios preexistentes o, por lo menos, de un microbio progenitor unisex.

Sin embargo, en este cuento hay cierta ironía: Pasteur, un católico serio, interpretó sus hallazgos, como todavía lo seguimos haciendo nosotros, en el sentido de que toda vida debe surgir de vida preexistente de la misma clase. Pero para Pasteur esto demostraba que la evolución no tenía lugar; demostraba que sólo Dios creó los numerosos tipos de vida. Los científicos actuales dan la vuelta a la argumentación: toda la vida, mantienen, no vino de la todopoderosa mano de Dios sino, con el tiempo, de la primera vida; y la primera vida se originó a partir de materia no viva del sistema solar. Ésta es la ironía.

Pasteur nos convenció de que las bacterias están igual de vivas que nosotros y de que la presencia bacteriana está relacionada con la infección y la contaminación alimentaria. Los brillantes experimentos de Pasteur disfrutan de un gran legado. Él estableció el punto de vista que prevalece: las bacterias, infecciosas y de hecho casi diabólicas, son «gérmenes» que deben ser destruidos. Los grandes éxitos de la medicina moderna han reforzado la idea de los microbios como enemigos. La limpieza, la esterilización de los instrumentos quirúrgicos, y especialmente los antibióticos, son todos descritos como armas de guerra contra los agresores microbianos.

La visión más equilibrada del microbio como colega y ancestro apenas se menciona. Nuestra cultura ignora el hecho, que costó mucho esfuerzo demostrar, de que estos «agentes» de enfermedad, estos «gérmenes», también fueron la semilla de toda vida. Nuestros ancestros, los gérmenes, eran bacterias.

¿Cuándo apareció la primera bacteria?

La generación espontánea, como demostraron triunfalmente Pasteur y otros, no tiene lugar hoy en día. Pero esta observación pasteuriana es mal interpretada por los creacionistas y otros dogmáticos para argumentar que la vida *nunca* partió de la no-vida. Algunos teóricos de la información sugieren que la probabilidad de que la vida se organizara a sí misma a partir de la no-vida mediante interacciones al azar de moléculas es tan pequeña que constituye una «prueba matemática» de que el origen de la vida fue divino. Pero, en mi opinión, la premisa de que la vida se originó como resultado de la mezcla aleatoria de moléculas falla por la base.

En 1953 empezaron a realizarse experimentos directos sobre el «problema de los orígenes de la vida». Stanley L. Miller, entonces un estudiante de doctorado de veintidós años del premio Nobel Harold C. Urey de la Universidad de Chicago, llenó útiles de laboratorio con gases que flotaban sobre una superficie de agua esterilizada. Durante una semana expuso su diorama en miniatura de la química de la Tierra temprana a electricidad periódica que simulaba los relámpagos. Mediante la técnica de la cromatografía en papel separó algunos de los muchos compuestos químicos orgánicos que se formaron espontáneamente. Reconoció entre ellos alanina y glicina, dos aminoácidos que se encuentran en todas las proteínas y en todas las células de los cuerpos vivos. Miller y Urey concluyeron con regocijo que tal «generación espontánea» de los componentes químicos de la vida era el resultado natural de la interacción química.

En el espacio, o sobre la Tierra temprana, pensamos que los compuestos orgánicos, como aquellos encontrados por Stanley Miller, se formaron espontáneamente a partir de precursores más sencillos. Evidentemente, Miller y Urey sólo pudieron hacer conjeturas sobre las características químicas del medio ambiente de la superficie de la Tierra temprana. Los gases que Miller utilizó en su montaje —hidrógeno, vapor de agua, amoníaco y metano— parecen razonables. Todos ellos son ricos en hidrógeno. El hidrógeno, el elemento mayoritario del sol, constituye más del 90 por ciento de la materia de todo el universo. Miller razonó que el hidrógeno probablemente era abundante sobre los planetas internos al

principio de la historia del sistema solar. De ahí surgió la noción de la «sopa primigenia», de que la vida emergió de un «puré», una estructura compleja como la que flotaba o se pegaba a los bordes de los matraces de Miller. La Tierra, pensamos, ya estaba macerándose en compuestos orgánicos sintetizados por la luz del sol y otras fuentes de energía mucho antes de que apareciera la vida. Un experimento parecido al de Miller tuvo lugar probablemente a escala planetaria. Si los humanos de veintidós años como Stanley podían producir aminoácidos en el laboratorio en unos pocos días, ¿por qué no pudo el laboratorio de la Tierra, en un experimento que duró mil o un millón de años, producir la vida?

Experimentos más recientes confirman que los precursores de la vida pueden ser producidos naturalmente en el laboratorio bajo condiciones que simulan el medio ambiente de la Tierra temprana. Las moléculas, sin embargo, no se combinan al azar: el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el fósforo, el oxígeno, el azufre y los demás elementos de la vida interactúan de acuerdo con las leyes de la química. La ciencia del calor y la energía, llamada termodinámica, tiene reglas que las moléculas obedecen. Ciertas reacciones químicas son mucho más probables que otras; la noción de que todas las combinaciones químicas tienen la misma probabilidad de suceder podría ser conveniente para demostrar lo poco probable que es la vida, pero no es exacta. Es más, si asumimos que la vida evolucionó desde el comienzo en gotitas lipídicas parecidas a células, las probabilidades en favor de la emergencia de sistemas dotados de una asombrosa capacidad de automantenimiento aumentan. De ello se sigue una tendencia hacia la complejidad.

Para mí la investigación más excitante relacionada con el origen de la vida que se está llevando a cabo actualmente es la de mi amigo Harold Morowitz. Al espacio, el tiempo y la causalidad en biología, Morowitz añade «la memoria». La biología, afirma, es el puente entre la física y la historia. Las rocas más antiguas sobre la Tierra, incluyendo las de la formación Isua en Groenlandia, tienen cerca de cuatro mil millones de años. Toda la vida tiene memoria química que no puede ser datada mediante medida directa. Es muy probable que la memoria metabólica de las células

modernas preceda incluso a las rocas más antiguas. Algunas rutas metabólicas, tales como los pasos enzimáticos que conducen desde los compuestos grasos a los esteroides como el colesterol, señala Morowitz, aparecen sólo en los animales. Otras, sin embargo, forman parte del «metabolismo primario»: las rutas metabólicas comunes a todos los seres vivos. Puesto que ciertas rutas metabólicas de compuestos carbonados son absolutamente necesarias para todos los metabolismos, las más tempranas que subyacen al fenómeno celular del automantenimiento y que estaban presentes desde el principio —las interacciones químicas del carbono, el nitrógeno, el azufre y el fósforo, en las que está basado todo metabolismo— debieron ser retenidas por todas las células en todas las épocas^[32]. Cualquier célula muere si su universalmente necesario metabolismo es obstaculizado por limitaciones ambientales, mutaciones letales del ADN u otras interferencias. Los sistemas químicos naturales que se hacen cada vez más complejos, incluso aunque sean capaces de hacer copias de sí mismos, no están necesariamente vivos. Tales sistemas se denominan «autocatalíticos». Un sistema autocatalítico es una serie cíclica de reacciones engranadas cuyo producto final es el mismo que su punto de partida. Algunas de estas reacciones han recibido el nombre de «relojes químicos» porque no alcanzan rápidamente un estado estable, sino que por el contrario se repiten y perduran. El sistema Belousov-Zhabotinsky es una colorida serie de reacciones autosustentadas. El ácido malónico es oxidado por el bromato en una solución de ácido sulfúrico que contiene átomos de cerio, hierro o manganeso. A medida que estas sustancias químicas reaccionan entre sí, una y otra vez, se producen olas espirales rotatorias y concéntricas que con frecuencia permanecen durante horas antes de alcanzar un patrón final estable. El análisis termodinámico interpreta estas reacciones como estructuras disipativas, como las describe el premio Nobel belga Ilya Prigogine. Una estructura disipativa es cualquier sistema que mantiene su función mediante la asimilación de energía útil y la disipación de energía inútil, normalmente calor. Las reacciones de las estructuras disipativas comparten ciertas características con la vida y con los sistemas químicos que evolucionaron convirtiéndose en vida. Pero todos los sistemas

químicos, tengan o no una estructura disipativa, sólo continúan operando y creando más materia ordenada durante un corto período de tiempo. Después se desmoronan.

A partir del análisis termodinámico y de la experiencia científica inferimos que las máquinas de movimiento perpetuo no pueden existir: aunque la energía misma no desaparece resulta irrecuperablemente transformada. El calor disipado no se puede recuperar. La energía de alta calidad, la energía que puede hacer trabajo, tiende a desaparecer con el tiempo. Los muñecos de nieve se derriten y no se vuelven a formar. Las copas y los vasos se rompen con mucha más frecuencia de lo que se vuelven a juntar. Desordenar una habitación es mucho más fácil que ordenarla. En termodinámica, domina el desorden. Que la energía se pierde y las cosas se desmoronan para no reunirse más es un hecho ineludible, una ley de la naturaleza. La vida, con su orden complejo, no viola la ley termodinámica de la inexorable tendencia hacia el desorden. La vida siempre necesita su fuente específica de energía de alta calidad. La luz del sol viaja a través de la vida, proporcionando energía para el trabajo cíclico, de forma muy similar a la manera en la que se canaliza la energía química a lo largo de una reacción Belousov-Zhabotinsky. Pero puesto que las células crecen y se reproducen para formar más células como ellas, una vez que la vida evolucionó la química vital nunca ha cesado. La vida cíclica, si tiene a su disposición una fuente continua de energía y nutrientes, hará infinitas copias de sí misma. Los sistemas químicos carecen de individualidad: no pueden producir más *individualidades*. La vida siempre ha sido identificada como una serie de individualidades: organismos o células. Éstas deben gastar energía para continuar existiendo pero lo hacen en inseparable conexión con la vida pasada. La vida ha estado, desde su creación y sin discontinuidades, químicamente conectada con su pasado.

Morowitz señala que el mapa metabólico acumulativo de los organismos vivos, obtenido por cientos de científicos fundamentalmente desde el comienzo de este siglo, es uno de los más grandes y minusvalorados logros intelectuales de la humanidad. Varios premios Nobel han obtenido sus galardones por descifrar fragmentos significativos del

metabolismo, las reacciones químicas engranadas de las células. Sólo Morowitz, que yo sepa, intenta organizar la enorme cantidad de detalles de información metabólica en un único todo coherente, una lente que nos permita mirar hacia el interior de la arcaica historia de la vida.

Puesto que la vida es intrínsecamente un sistema de almacenamiento de memoria, algunos de los argumentos que se han propuesto para explicar su origen me parecen poco probables. Se ha afirmado que los cristales, el vidrio, los coacervados, la arcilla y la pirita férrica (el oro de los locos) eran todos la clave de los tempranos sistemas químicos prebióticos. Algunos intentan vender fisuras en las rocas o partículas de arcilla como los lugares donde se originó la vida. En las células limitadas por membrana de casi todos los seres vivos existen recintos llenos de fluido. Recintos similares, las bolsas químicas llamadas liposomas, se forman también de manera natural. Estos liposomas (vesículas membranosas) aparecen espontáneamente en los llamados experimentos del origen de la vida. En mi opinión, esta clase de gotitas representan con más probabilidad la arquitectura natural original de la vida que la pirita férrica, la arcilla o el vidrio. Aquí se puede invocar un principio de continuidad de la vida, de memoria de la vida. Creo que la proverbial sopa primigenia de ADN o ARN flotante nunca existió, porque los ácidos nucleicos (ADN, ARN) se destruyen mucho más fácilmente de lo que se forman espontáneamente. Las estructuras membranosas son el *sine qua non* de la vida. Hoy las entidades limitadas por membrana con identidad e integridad son las células. La vida surgió en su plenitud celular. Las células de hoy en día son, como dice Morowitz, «verdaderos fósiles».

En todas las células actuales los genes están hechos de ADN. El ARN, bastante parecido al ADN, es necesario en todas las células para sintetizar proteínas. La secuencia precisa de aminoácidos confiere a una proteína la mayor parte de su estructura, y así determina qué es lo que hará, de la misma forma que la secuencia de letras da a las palabras escritas su significado. Las proteínas existen en muchas formas y tamaños y poseen cientos de funciones. Algunas bombean iones: sodio, hidrógeno, fosfato, potasio y otros. Otras proteínas unidas a los pigmentos proporcionan

receptores de energía en los ojos oscuros, la piel con manchas, las cianobacterias verdes y los plastos algales. Los músculos son fundamentalmente proteínas; la sangre, la piel y la lengua son complejos de muchas proteínas empaquetadas en células.

Las células funcionan mediante un sistema de dos partes. Primero, copian o «replican» sus genes. Este paso productor de genes es la síntesis del ADN. El ADN es copiado y una copia de la información genética se guarda en reserva. La otra copia es «traducida»: se producen secuencias de bases idénticas de partes seleccionadas del genoma en forma de ARN. Dentro de la célula —en diminutas «fábricas» llamadas ribosomas— el ARN dirige la fabricación de proteínas de cadena larga. Proteínas de tipos diferentes, de tres mil a diez mil por célula, forman la mayor parte del cuerpo de un organismo. Al final el crecimiento es sinónimo de síntesis de proteínas (y, por supuesto, de obtención de agua). Juntos, en una bolsa membranosa llena de fluidos, el ADN, el ARN y las proteínas constituyen la estructura dotada de automantenimiento de las células. Sin embargo, la molécula de ARN es más versátil que su complemento de ADN. Dado el apropiado clima químico, y sin que haya ninguna proteína presente, el ARN puede hacer copias de sí mismo autocatalíticamente. El ADN, por otro lado, requiere tanto ARN como proteínas enzimáticas para completar su trabajo de replicación; el ADN por sí solo está muerto. La capacidad del ARN tanto para acelerar reacciones químicas como para replicarse sugiere que el ARN precedió al ADN en la historia de la vida. Podemos utilizar el ARN como un índice de proximidad a la pre-vida. No hay nada más pequeño que una célula viva que mantenga su identidad y produzca un mayor número de ejemplares de sí misma. Desde el comienzo, la vida era una célula, una interacción mutua entre moléculas de genes (como el ARN) y una membrana grasa que las segregaba de su entorno.

El físico Freeman Dyson sugiere que la primera vida surgió de una simbiosis molecular, una reunión de «criaturas proteicas» relativamente amorfas y la supermolécula ARN. Como la mayoría de nosotros, Dyson está impresionado por el carácter supermolecular del ARN que, como el ADN, se replica a sí mismo pero que, a diferencia del ADN, también dirige a los

aminoácidos durante la formación de las secuencias proteicas. Aunque creo que Dyson hace un mal uso de la palabra *simbiosis*, su relato del desarrollo independiente de secuencias macromoleculares seguido por fuertes interacciones tiene sus méritos^[33].

Como Dyson sabe, los experimentos de laboratorio confirman los singulares talentos de la molécula de ARN. A finales de los años sesenta, en el Instituto Göttingen alemán, el físico y premio Nobel Manfred Eigen mostró moléculas de ARN que se replicaban solas en el interior de un tubo de ensayo. Él y sus colegas, incluyendo a Don Mills, de la Universidad de Columbia, y el fallecido Sol Spiegelman, de la Universidad de Illinois, en Urbana, mostraron que el ARN de tubo de ensayo podía mutar dando nuevas moléculas de ARN que se replicaban más rápidamente que sus «progenitoras». Las moléculas de ARN del tubo de ensayo por sí mismas, como los virus, las proteínas o el ADN en solución, están muertas. Aun así los sistemas moleculares pueden proliferar y mutar en el tubo de ensayo cuando se les proporciona un sustento adecuado^[34].

Thomas Cech, de la Universidad de Colorado, y Sidney Altman, de la Universidad de Yale, muy jóvenes ambos a principios de los ochenta, hicieron el descubrimiento clave. Ciertas moléculas de ARN no sólo se replican sino que actúan como proteínas: se ensamblan a sí mismas. De esta manera disponen su propia forma molecular. Cech y sus colegas probaron sin sombra de duda —es decir, sin proteínas contaminantes— que el ARN se comporta como el tipo de proteína que puede redisponer y reorganizar el material genético. Este tipo de ARN recibe el nombre de «ribozima». En un tubo de ensayo y en presencia de ribozimas los trozos de ARN, junto con pequeñas partes de repuesto (los compuestos químicos llamados ribonucleótidos), evolucionan por sí solos. Me gustaría poner énfasis en que la mezcla de ARN —esté o no encerrada dentro de un liposoma— todavía no es una célula. Las moléculas de ARN y/o de ADN en una botella no están en absoluto vivas. Si no son manipulados, ni el ADN ni el ARN de un tubo de ensayo son siquiera un virus. Son alimento para cualquier bacteria, protista u hongo que tenga iniciativa. Pero las moléculas de ARN evolucionan en el tubo de ensayo, sugiriendo que la evolución bioquímica

podría haber precedido a la vida. Gerald Joyce y Jack Szostak, de la Universidad de California, en San Diego, crearon mediante ingeniería ribozimas que aceleraban la replicación del ARN. Wally Gilbert, un científico de la Universidad de Harvard galardonado con el Nobel, acuñó la pegadiza frase «mundo de ARN». Gilbert fijó su atención en el potencial del ARN, sugiriendo entre otras buenas ideas que —actuando como ribozima replicante— el ARN formó el fundamento de la primera célula viva. Estoy bastante de acuerdo con Wally en que las reacciones de aceleración metabólica del ARN y las moléculas replicantes precedieron a cualquier molécula basada en ADN. Sin embargo, como subraya Morowitz, tanto los tipos de metabolismo ARN como los ADN viven *dentro* de células.

No existe ninguna forma de vida que no sea una célula dotada de automantenimiento y autorreproducción. Incluso la forma de vida más reducida y mínima sobre la Tierra es extraordinariamente compleja. Una célula bacteriana sin pared, tan sólo una diminuta esfera limitada por una membrana, requiere una pléthora de interacciones moleculares, más de quince tipos de ADN y ARN y al menos quinientos tipos diferentes de proteínas (aunque normalmente la cifra se acerca más a los cinco mil tipos). El ARN por sí solo, el ADN por sí solo o cualquier virus solo no están vivos. Todas las células vivas, incluso en principio, son mucho más complicadas que cualquier gen o virus. Las células intercambian sus partes; se mantienen continuamente a base de nutrientes y energía que extraen de sus alrededores. Estoy de acuerdo con Morowitz: las primeras formas de vida fueron células limitadas por membrana y dotadas de automantenimiento como las que todavía existen hoy.

Utilizando el principio de continuidad, Morowitz considera a los autótrofos —bacterias que hacen su propio alimento y generan su propia energía a partir de materiales inorgánicos— las células limitadas por membrana originales. Los fotoautótrofos no tienen que comer; utilizan la luz del sol para obtener energía. Los quimioautótrofos no tienen que comer; utilizan compuestos químicos ricos en hidrógeno sin la ayuda de la luz para obtener energía. Tanto los fotoautótrofos como los quimioautótrofos

obtienen el carbono del dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera. Ninguno come compuestos orgánicos, es decir, ninguno necesita alimento. Las plantas, las cianobacterias y las bacterias oxidadoras de amoníaco, sulfuro y metano son todas ellas autótrofas. Lo opuesto a un autótrofo es un heterótrofo: cualquier organismo (herbívoro, alguívoro, bacteriófago, carnívoro o caníbal) que come alimento. «Comer alimento» es lo mismo que tomarlo en forma de materia orgánica prefabricada. Todos los heterótrofos comen moléculas orgánicas hechas por los autótrofos. Los autótrofos «comen» aire, «comen» luz del sol o emplean el mefítico poder de los compuestos ricos en hidrógeno, como el hidrógeno gaseoso (H_2), el metano (CH_4), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) o el amoníaco (NH_3), para hacer más copias de sí mismos. La energía de los autótrofos es la misma que la del fuego: los compuestos ricos en hidrógeno reaccionan con el oxígeno. Morowitz piensa que los autótrofos, todavía cercanos a la inerte geoquímica original de la Tierra, fueron el tipo original a partir del cual brotamos el resto de nosotros. Razonando que los autótrofos están más cerca de los ciclos termodinámicos originales de la vida, Morowitz postula que la forma quimioautotrófica de vida precede incluso a la fotoautotrófica.

En sus seminarios, Morowitz descubre paso a paso las capas químicas de la cebolla. Los demás escuchamos y conversamos. Mis estudiantes y yo disfrutamos ayudando a Morowitz y a otros a seguir la historia de la vida desde su presente viviente hasta su pasado químico inerte. Necesitamos conocer la transición desde la química prebiótica hasta la vida basada en la célula para saber cómo evolucionaron los orgánulos. ¿Emergieron directamente a partir de la previda y se hicieron más complejos o son bacterias reducidas? Pienso y leo mucho sobre esto, pero lo que hago con los estudiantes y los colegas en el laboratorio y en el aula es diferente. Allí tratamos directamente con la vida: microbios y otras células vivas y sus partes. Las bacterias, los prototistas, las plantas o los hongos son nuestros objetos de estudio. Yo rastreo, con mis estudiantes y mis colegas, la historia de la vida desde sus orígenes microbianos. Observamos el crecimiento y la reproducción; espiamos la sexualidad y la maduración física de los

protoctistas; medimos las respuestas de las bacterias y los protistas a los «insultos» medioambientales. Estamos especialmente interesados en el comportamiento, las vidas ricamente sociales y la interacción con los sedimentos de estos microbios a medida que forman estructuras comunitarias persistentes.

El origen de las células a partir de compuestos químicos inertes podría haber tenido lugar una o varias veces. En cualquier caso, las primeras células de nuestro linaje fueron sistemas proteicos limitados por membrana, basados en ARN y ADN y dotados de auto-mantenimiento. Se parecen mucho a nosotros en algunos detalles de su estructura celular y su comportamiento metabólico. Intercambiaban constantemente sus materiales constituyentes con el medioambiente externo. Daban salida a los residuos a medida que adquirían alimento y energía. Sus modelos persistieron a medida que llenaban sus tripas de compuestos químicos tomados de los alrededores. De hecho, las antiguas bacterias metabolizantes eran tan eficaces rehaciéndose a sí mismas cuando eran amenazadas con la desintegración y el fallecimiento termodinámico que hoy en día el interior de nuestros cuerpos es químicamente más afín al medio ambiente externo de la Tierra temprana, en el que se originó la vida, que a nuestro actual mundo rico en oxígeno. La vida, siempre hecha de células que crecen y se dividen, literalmente ha preservado su pasado en forma de química. El libro de la vida está escrito en un lenguaje que no es ni el de las matemáticas ni el inglés: es el lenguaje de la química del carbono. «Hablando» el lenguaje de la química, las bacterias se diversificaron y hablaron las unas con las otras a escala global. Aquellas que nadaban se unieron a aquellas que degradaban glucosa —el azúcar— y de esta manera obtuvieron energía para nadar. La asociación de nadadoras y degradadoras de glucosa condujo a los protistas. El resto es historia; mi visión SET de la historia.

6. SEXO ANIMAL

Cuando el Amante es Mendigo
Su rodilla es abyecta—
Cuando el Amante es Dueño
Es diferente— (1314)^[VII]

El sexo es un asunto delicado. La esencia del sexo a lo largo de la evolución de la vida es la reunión de células con género complementario en una unión efímera o prolongada. Biológicamente, el meollo del sexo es una atracción entre géneros lo suficientemente fuerte para que conduzca a la recombinación de los genes de las células apareadas. Surgen nuevos seres que difieren en su constitución genética de las células con género que se encontraron y se recombinaron. En el sexo al estilo animal, la mitad de los genes vienen del óvulo y la mitad de la célula espermática.

Las bacterias transmiten sus genes disolutamente a medida que una dona sus genes a otra. No existe ninguna distribución cincuenta-cincuenta para las bacterias. Ellas literalmente recogen genes, normalmente unos pocos cada vez. El donante se aparea cuando «él» entra en contacto físico con «ella», un receptor bacteriano vivo. «Ella» tiene el mismo aspecto que «él». La adquisición de genes también podría ser una recogida casual; el receptor simplemente tomaría los genes previamente derramados en el agua por algún donante muerto. Los genes adquiridos pueden servir para la producción de vitaminas, la exhalación de gases u otros rasgos que aumenten sus posibilidades de supervivencia. A veces codifican proteínas que permiten al receptor destoxicificar venenos que ponen en riesgo su vida. El sexo bacteriano es siempre unilateral. Los genes, y sólo los genes,

pueden pasar a la célula receptora desde cualquier parte: el agua, un virus, o un donante vivo o muerto.

El sexo humano, como el de los animales, es un proceso impactantemente diferente. Este sexo de fusión celular, llamado sexo meiótico, es igual para los animales y para las plantas. El sexo meiótico no es opcional. Las plantas y los animales no «bebén» genes de aguas ricas en ADN; lo que sucede más bien es que las células espermáticas procedentes del progenitor masculino son atraídas hacia las células óvulo procedentes de la hembra y la fusión tiene lugar. La fertilización estimula el desarrollo del embrión. Una única célula nueva, el óvulo fertilizado —el zigoto—, ya sea animal o vegetal, tiene ahora dos juegos de cromosomas, mientras que el óvulo y el espermatozoide originales tenían sólo uno. Después, el óvulo fertilizado crece por división de sus células duplicadas. Una se divide en dos, dos en cuatro, cuatro en ocho y así sucesivamente. Todas las células se mantienen unidas, como unidas forman el embrión. El óvulo fertilizado se convierte en un miembro reconocible de su especie. El nuevo renacuajo, brote de musgo, planta con semilla, reptil, bebé llorón u otro ser multicelular lleno de juventud que se desarrolle a partir del embrión es la prueba viviente de que los animales y las plantas están relacionados los unos con los otros más cercanamente de lo que lo están con el resto de la vida. La vida sexual de todos los numerosos seres que nunca forman embriones difiere profundamente de la de las plantas y los animales. Las bacterias y los descendientes microbianos de su simbiogénesis (protoctistas y hongos) tienen otros hábitos sexuales.

Las bacterias no necesitan el sexo para reproducirse desenfrenadamente. El sexo bacteriano, que responde a determinadas contingencias medioambientales, es ocasional. En contraste, la vida sexual de las plantas y de los animales es absolutamente imprescindible para la construcción de embriones. Sin sexo, la historia vital de los animales y las plantas se detiene. Al principio del ciclo vital de las plantas y los animales el núcleo del espermatozoide se fusiona permanentemente con el del óvulo. Esta unión recuerda a las fusiones cíclicas simbióticas: los socios se reconocen el uno al otro^[35]. Ellos emplean células emisarias. De hecho sus membranas

celulares permiten el paso de (por lo menos) los núcleos. Las membranas disueltas se vuelven a formar mientras las células amantes se fusionan. Abierto y vulnerable, ¡el óvulo «sabe» que no debe derramar su contenido y que sólo debe dejar entrar a los núcleos y citoplasmas correctos!

Los procesos sexuales, la fusión de seres que se atraen, probablemente se originaron como lo hicieron las simbiosis tempranas. Tanto en las fusiones sexuales como en las simbióticas el hambre fue probablemente un factor primordial que empujó a los desesperados a fusionarse. Sin embargo y por definición, las células que se juntan en el sexo constituyen los genes y el citoplasma de individuos con género que son miembros de la misma especie.

En nuestro libro *The Origins of Sex (Los orígenes del sexo)*, Dorion Sagan y yo manteníamos que el sexo meiótico comenzó mucho después de que apareciera el sexo bacteriano como canibalismo abortado en ciertos protistas^[36]. Para comprender la enrevesada historia del sexo, declarábamos, uno necesita conocer la biología de los protoctistas.

Explicábamos cómo las fusiones sexuales y las simbióticas reúnen genes distantes dentro de un organismo recombinado. El sexo difiere de la simbiosis en que la fusión cíclica y la posterior separación tienden a ser mucho más predecibles, mucho menos creativas y casuales que las de las simbiosis temporales. En el sexo, la prole se parece mucho a sus padres y las diferencias entre los géneros están ritualizadas y son predecibles.

Los cuerpos formados mediante fusión simbiogenética, como las raíces noduladas de las leguminosas, las hidras verdes, las vacas rumiantes, los peces luminosos y las algas rojas, difieren profundamente de cada uno de los socios progenitores que se fusionan. La simbiogénesis es mucho más espléndida que el sexo como generadora de novedad evolutiva. Cuando los progenitores son parientes extremadamente cercanos —por ejemplo, las algas rojas no foto-sintéticas que viven en (o más bien «de») sus parientes, otras algas rojas fotosintéticas— el sexo y la simbiosis son difíciles de distinguir incluso operacionalmente. Pero cuando los progenitores simbióticos son parientes lejanos —por ejemplo, las leguminosas y los rizobios bacterianos, o las vacas y sus ciliados entodiniomórficos del rumen

— los productos de estas fusiones son sorprendentemente diferentes de ambos progenitores.

La muerte programada es una consecuencia inevitable del modo de vida sexual. El gran ciclo en el cual los machos y las hembras hacen espermatozoides y óvulos con un juego de cromosomas, sólo para reunirlos de nuevo en una prole con dos juegos de cromosomas, está ligado íntimamente al imperativo mortal de los individuos vegetales y animales. Evidentemente todos los organismos, incluyendo las bacterias y muchos protoctistas, pueden morir por causas externas. El hambre, la desecación y los venenos son grandes asesinos. Pero la muerte por destrucción carece de una programación natural e incorporada. La evolución desde los ancestros protoctistas hasta los cuerpos animales y vegetales exigió sacrificios y pérdidas; la multicelularidad y la creciente complejidad estuvieron acompañadas desde el comienzo por el envejecimiento y la muerte de los cuerpos individuales. La muerte, la desintegración literal de la carcasa del cuerpo, fue el macabro precio que hubo que pagar por la sexualidad meiótica. El desarrollo complejo en los protoctistas y sus descendientes, los animales y los vegetales, condujo a la evolución de la muerte como una especie de enfermedad de transmisión sexual. Hace más de mil millones de años, cuando los protoctistas evolucionaron mediante la integración de simbiontes bacterianos en comunidades permanentes y estables que se convirtieron en los individuos protoctistas, apareció por primera vez el tipo de muerte programada que hoy tanto nos inquieta.

Muchos protoctistas exhiben todavía variaciones sobre el extraño tema del sexo y la muerte. He observado al *Stentor coeruleus* vivir y morir. Este ciliado azul, un microorganismo grande que se puede capturar fácilmente en lagos y estanques de agua dulce no contaminada, se reproduce por parentesco único. Todos los días un individuo crece y se divide en dos. En primavera, y en grupos numerosos, los ciliados azules se aparean. Las orgías microscópicas prosiguen mientras todos los *stentor* del mismo colectivo se aparean y se unen apasionadamente. ¡Los miembros de la pareja se quedan pegados durante treinta y seis horas consecutivas! Pero

ambos socios del encuentro amoroso mueren siempre en menos de una semana. El sexo, al final de la vida de estos protistas, es devolutivo^[37].

Los animales, todos ellos, los treinta millones de especies estimadas incluidas en casi cuarenta *phyla*, vuelven en cada generación a un estatus parecido a un protista unicelular. Las células sexuales de tipo protista disfrutan de fusiones sexuales cuando las células animales repiten el estilo de vida de sus ancestros. En los animales, las plantas e incluso los hongos, el sexo no es una opción prescindible para permanecer en el juego evolutivo. En estos seres la organización vital se genera mediante la fusión, mediante el acto sexual. La mortalidad es el precio que pagan por sus elaborados tejidos y sus complejas historias vitales.

La evolución del gran panorama de la vida moderna sobre la Tierra a partir de las antiguas bacterias simbióticas es un gran drama. También maravilloso, aunque menos espectacular, es el desarrollo de los adultos maduros a partir de un zigoto, la célula óvulo fertilizada. La evolución ha proseguido durante 3500 millones de años. La ocupación de la «maravilla azul» en el espacio negro por la especie humana es inferior a 3,5 millones de años. Un ser humano individual se desarrolla en menos de 35 años. El tiempo se concentra, la materia se orquesta y, casi invariablemente, un ser sensible aparece como resultado. ¿Cómo podemos localizar con exactitud el comienzo de la vida humana? Desde el punto de vista biológico, esta pregunta es absurda, totalmente artificial. La datación del «comienzo de la vida humana» es una simple convención. En mis conferencias públicas me preguntan con frecuencia: «¿En qué momento comenzó la vida humana?». ¡Evidentemente comenzó, como toda la vida, hace por lo menos 3500 millones de años! La pregunta refleja un malentendido. Una vez que los genitales de los progenitores se encuentran a tiempo, tiene lugar la concepción que es seguida por el nacimiento como la culminación de un desarrollo intrauterino predecible. El desarrollo comienza cuando un espermatozoide ondulipodiado se encuentra con un óvulo lleno de grasa que se mece sacudido por los ondulipodios que recubren las trompas de Falopio de la madre. El espermatozoide haploide que, a diferencia de sus compañeros, sobrevive al viaje se combina con el óvulo haploide. El óvulo

emite, como bienvenida al ganador de la carrera de espermatozoides, una baba proteica que actúa como barrera para los pretendientes rezagados. La cabeza del espermatozoide ganador, con sus veintitrés cromosomas que llevan todos los genes del padre, penetra en la gran célula óvulo, cuyo núcleo contiene veintitrés cromosomas maternos muy similares. Las dos células se fusionan. Este acto de «fertilización» da lugar a una célula duplicada, que contiene ahora cuarenta y seis cromosomas. Cada uno de los veintitrés pares está formado por un cromosoma materno, procedente de la madre, y otro procedente del padre.

El óvulo fertilizado de los mamíferos recuerda a los antiguos protistas, probablemente los primeros seres con número doble de cromosomas que evolucionaron. Pero a diferencia de sus ancestros, ningún óvulo mamífero permanece perezosamente en la unicelularidad. Tampoco utiliza sus ondulipodios para nadar por el agua de un estanque en busca de alimento bacteriano. No, la célula zigoto se divide y los productos de la división permanecen juntos. El resultado son embriones humanos. Una esfera de células crece y se diferencia para formar tejidos, y con el tiempo órganos, en un todo con aspecto de pez.

Las células continúan dividiéndose, creciendo, moviéndose las unas con respecto a las otras y comunicándose entre sí, y el embrión se convierte en un feto. A medida que se desarrollan los órganos pierde su apariencia de pez, reabsorbe sus hendiduras branquiales y su cola intrauterina vestigial y comienza a adoptar la forma humana. En el útero, un feto con la boca abierta podría incluso chuparse el dedo. Incapaz de respirar aire, respira mediante su cordón umbilical. A través de la placenta, el feto extrae el oxígeno de la sangre de su madre. Una vez en el mundo aéreo, el recién nacido, si es hembra, tiene ya su dotación vital de óvulos no fertilizados colocados en su lugar dentro de sus diminutos ovarios. Cada óvulo tiene veintitrés cromosomas, la mitad que el resto de las células del cuerpo de la niña recién nacida. Como las células de sus dos progenitores, el número de cromosomas en su cuerpo, cuarenta y seis por célula, ya está duplicado. El número de cromosomas ya está duplicado también en todas las células del cuerpo de los recién nacidos varones. Ellos no producen espermatozoides

con veintitrés cromosomas hasta la adolescencia. Cuando ésta irrumpie, las células fabricantes de espermatozoides de sus testículos, estimuladas por las hormonas masculinas, comienzan a producir espermatozoides continuamente. Los espermatozoides, con un único juego de veintitrés cromosomas, siguen formándose hasta los noventa años. Sin unión fértil, penetración sexual y persistencia de la prole, nada cuenta en el terreno de juego de la evolución. Si todos nuestros ancestros simiescos no se hubieran apareado apasionadamente para procrearnos, nos habríamos extinguido hace mucho. Ser un animal es ser sexual.

¿Cómo se originó la multicelularidad? Muchos de mis colegas y sus lectores consideran ésta una de las grandes preguntas de la evolución. Los cuerpos animales crecen sin sexo mediante divisiones celulares mitóticas del óvulo fertilizado. Pero ¿cómo evolucionaron los cuerpos de los animales más tempranos? Las células nucleadas, como los protoctistas, comenzaron a clonarse hace por lo menos 1000 millones de años. Los clones, copias del organismo, eran el resultado de la división celular. ¿De dónde surgió la necesidad de sexo?

Los animales más antiguos del registro fósil se encuentran bien conservados en más de veinte lugares por todo el mundo: Sonora, México; el norte de San Petersburgo, en el mar Blanco de Rusia; Ediacara, en Australia del sur; Namibia, en el sudoeste de África; en lugares dispersos de China, y por todas partes. Allí se han conservado restos de animales de entre 650 y 541 millones de años de antigüedad. Aun así, cientos de millones de años antes de que estos animales vivieran, los protistas sexuales ya se habían clonado y habían permanecido unidos. Los «individuos» con partes del cuerpo diferenciadas en tejidos fueron seleccionados naturalmente. Diferentes clases de colonias de protoctistas, algas verdes, hongos mucosos, plasmodios y muchos otros, anteriormente amorfos, fueron creciendo en complejidad e individualidad a medida que evolucionaban. La mejor manera de ver a los individuos que hoy reconocemos como plantas, animales y hongos es como clones protoctistas altamente integrados. Seleccionados naturalmente, se convirtieron en seres nuevos y más grandes.

Los animales —los celenterados, los braquíópodos y los treinta y cinco *phyla* restantes— evolucionaron en los océanos hace alrededor de 500 millones de años. Los animales aparecieron mucho antes de que hicieran su aparición los reinos de las plantas, los hongos y el resto de los organismos terrestres. Las escalas de tiempo geológico tradicionales agrupan, y de esta manera menosprecian, todas las apariciones anteriores a hace 541 millones de años bajo el apelativo de precámbricas. El Cámbrico, en honor a las rocas de Cambria (un nombre antiguo de Gales) en las cuales se encontraron por primera vez animales esqueletizados, todavía cautiva la imaginación paleontológica. ¿Cómo evolucionaron los animales? Un argumento tradicional, propuesto por el geólogo Presten Cloud (1910-1992), es que las crecientes concentraciones de oxígeno atmosférico permitieron evolucionar a la vida animal después de miles de millones de años de bacterias y algas. Mis colegas Mark McMenamin y su mujer, Dianna, han mostrado que la aparición de los animales está lejos de ser un fenómeno de causa única y simple. El oxígeno es necesario pero no suficiente. Muchos factores medioambientales y genéticos condujeron hasta los primeros seres producidos mediante óvulos fertilizados por espermatozoides.

Aplaudo el análisis de los McMenamin. La vida animal no estaba restringida por la anoxia, para evolucionar de repente cuando el oxígeno se consolidó en la atmósfera. No creo que el oxígeno limitara nunca ninguna forma de vida excepto a las bacterias y a algunos oscuros protistas. El oxígeno era necesario pero no suficiente para asegurar la expansión de la vida animal.

Todos los animales son aerobios absolutos. Sus mitocondrias demandan constantemente oxígeno, o de lo contrario mueren. El oxígeno del aire, incluso en abundancia, precedió probablemente en más de 500 millones de años a la aparición de los animales. Las partes duras, como los esqueletos de fosfato cálcico de los peces, los exoesqueletos quitinosos de los artrópodos y las conchas de carbonato cálcico de los bivalvos, los caracoles y otros moluscos, probablemente empezaron siendo un residuo. El ion calcio, abundante en los mares, es venenoso dentro de la célula. La

concentración de calcio dentro de la célula debe mantenerse mil veces inferior a la del agua del mar, o de lo contrario los microtúbulos de la mitosis se detienen y cesa el crecimiento. La secreción de calcio, que comenzó como una eliminación de desperdicios, evolucionó produciendo un estilo innovador de reciclaje que condujo a los sistemas de sustento estructural. Los dientes, los caparazones y los esqueletos evolucionaron. A medida que el residuo endurecido de calcio precipitaba en las aguas ricas en fosfato fue derivado a usos inteligentes, económicos y viables.

Los humanos podríamos tener en cuenta esta lección. Nosotros siempre creamos residuos; la vida debe excretar a medida que prolifera. Nadie se sorprende cuando alguien crea artefactos útiles a partir de automóviles desguazados o la vajilla de plástico de las fiestas. La metamorfosis de la polución tiene precedentes. Prudente e inconscientemente, hemos seguido la senda de nuestros ancestros remotos.

A mediados del Cámbrico, la vida se había propagado magníficamente produciendo formas animales que nos fascinan. *Hallucinogenia* es un monstruoso ser de pequeño tamaño tan diferente a las formas modernas que sus descubridores no tenían claro si las protuberancias que mostraba eran espinas protectoras sobre su espalda o patas que sobresalían. Otro animal de la era cámbria, *Pikaia*, era un veloz nadador de cuerpo blando que ahora creemos que podría ser el abuelo último de todos los animales vertebrados.

Las discusiones entre mis amigos no cesan. En alrededor de dos docenas de localidades por todo el mundo, conservadas en areniscas de entre 650 y 541 millones de años de antigüedad (mucho antes del período Cámbrico), hay abundantes formas de vida de gran tamaño que todavía no han sido identificadas, ni siquiera adscritas a un reino. ¿Qué son los ediacarenses? ¿Son una fauna fósil? ¿Eran protoctistas? ¿Eran animales unos y protoctistas otros? ¿Qué provocó su extinción? Si se desarrollaron a partir de embriones animales (blástulas), no contamos con resto alguno de ello. Todos los animales se desarrollan a partir de una blástula, pero por ahora no hay forma de saber si estos extraños seres lo hicieron o no. (Las posibilidades de encontrar embriones ediacarenses han aumentado mucho desde que se está aplicando la microscopía electrónica de barrido al estudio

de rocas sedimentarias ricas en fósforo llamadas fosfalitos). Mark McMenamin trata de convencerme de que *Pteridinium*, parecido a una hoja, y *Tribrachidium*, con tres brazos, no eran animales. Los ve como un linaje distinto de una era más tranquila, convergente con los animales, pero no animales. Eran protoctistas que no dejaron descendientes (Figura 6).

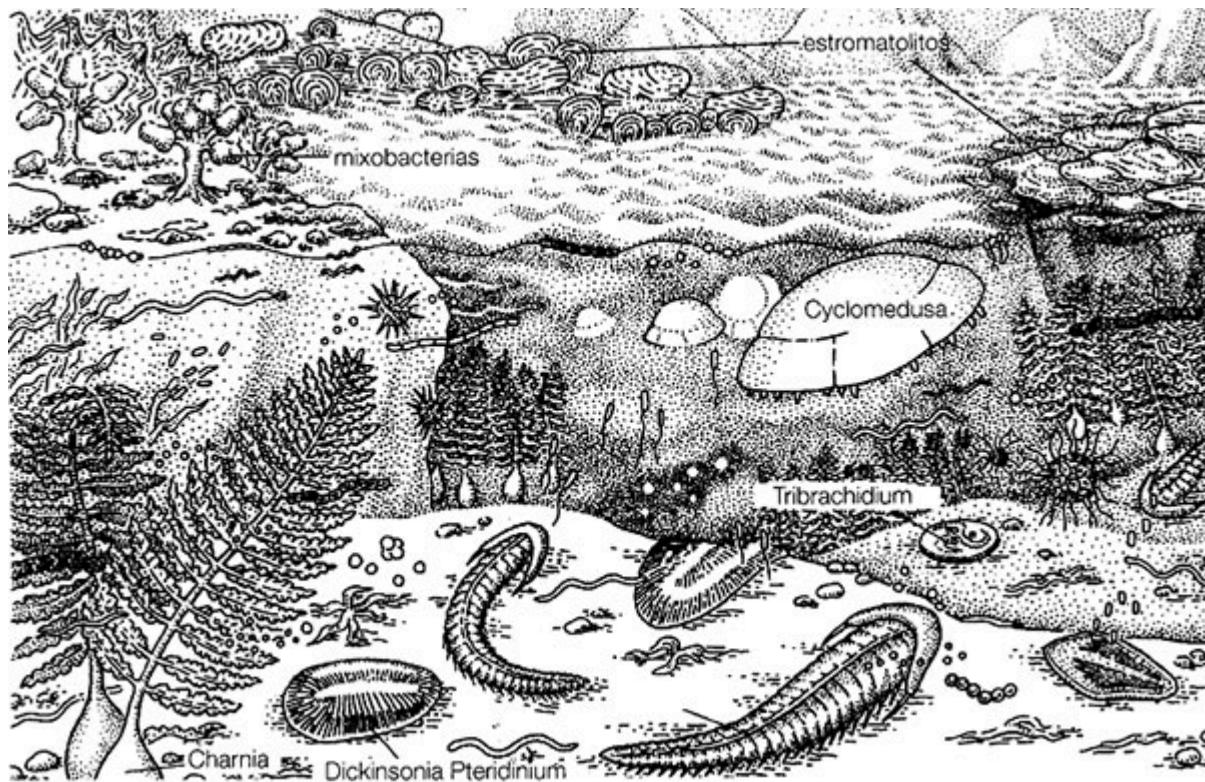


Figura 6. Biota ediacarense de finales de la era proterozoica.

Las plantas evolucionaron a partir de protoctistas acuáticos, algas del tipo de las clorofitas o algas verdes. Otras algas familiares incluyen las rodofitas ricas en yodo (algas rojas) que son el envoltorio comestible de los rollitos de sushi de los restaurantes japoneses. Puesto que nunca se desarrollan a partir de ninguna clase de embrión, las algas marinas, como las rodofitas y todas las demás, no son plantas. Ciertas algas indiferenciadas y reminiscentes de los hipotéticos ancestros de las plantas nos proporcionan una evocadora serie de indicadores evolutivos. Su existencia muestra una ruta plausible desde la unicélula protoctista a la descendencia pluricelular.

Esto les ha sucedido una y otra vez a muchas formas de vida. Las unicélulas se dividieron y la prole no consiguió separarse, como cuando las grandes algas volvocales evolucionaron a partir de ancestros de *Chlamydomonas*. Las algas rosas de la nieve de las altas Rocosas y los Alpes y el tinte rojo de la nieve en Hawley Bog, en el noroeste de Massachusetts, son miembros de este grupo de resistentes formas de vida. Aunque sea una solitaria empedernida, *Chlamydomonas* se parece mucho a una célula individual de *Volvox*, una esfera rotatoria mucho más grande. *Volvox* está constituido por una capa de 500 a 500 000 células parecidas a *Chlamydomonas gonium*, un disco algal compuesto de cuatro, ocho, dieciséis o treinta y dos células verdes parecidas a *Chlamydomonas* embebidas en un gel translúcido, es una fase intermedia en esta serie. Juntas, estas algas volvocales — *Chlamydomonas*, *Gonium*, *Pandorina*, *Eudorina* y *Volvox*— representan variaciones sobre el tema de los clones cuyas células se quedan pegadas y constituyen individuos multicelulares. La especie *Gonium sociale* parece una lámina plana hecha de cuatro elementos, sus células. Cualquier célula de *Gonium sociale* podría romperse, salir nadando y fundar su propia colonia. Una esfera progenitora de *Volvox* forma colonias hijas dentro de sí misma. Éstas liberan una enzima que disuelve la gelatina que mantiene al progenitor unido y varias proles pequeñas «salen del cascarón». Cuando cambian la estación o la luz, *Volvox* cambia de estado de ánimo y se pone *sexy*. Una colonia *sexy* de *Volvox* libera óvulos; otra libera espermatozoides; y, si son hermafroditas, las esferas verdes translúcidas idénticas liberarán tanto óvulos como espermatozoides. Navegando por el agua con los ondulipodios hacia adelante, las células sexuales nadadoras de color verde recuerdan superficialmente a células sueltas de *Chlamydomonas*. Pero no son individuos. Son mensajeros sexuales, potenciadores de individuos multicelulares del género *Volvox*. Probablemente la biota ediacarense estaba plagada de estilos de vida similares de multicélulas ahora extinguidos.

Trabajando juntas, las células se convierten en colonias y las colonias se convierten en individuos con niveles crecientes de organización. La diferenciación de los tejidos requiere la repetición de procesos pasados de desarrollo. En las plantas y los animales la fertilización por fusión de

células sexuales representa el punto de partida de la historia de la vida. Incluso las plantas como el diente de león, las fresas, los licopodios y las hierbas (que están conectados por estolones subterráneos y crecen sin los beneficios del sexo) con el tiempo se ponen *sexys*. Los animales que aparentemente han dejado de lado el sexo, como algunos grupos femeninos de lagartos, todavía experimentan procesos sexuales, meiosis y fertilización a nivel celular. Una célula femenina con un juego de cromosomas se fusiona con otra célula femenina. La madre tiene relaciones sexuales celulares consigo misma para producir un zigoto sin padre que se transforma en el embrión animal.

«Nosotros», una especie de edificación barroca, somos reconstruidos aproximadamente cada dos décadas por bacterias simbióticas mutantes y fusionadas. Nuestros cuerpos están hechos de células sexuales protoctistas que se clonian a sí mismas por mitosis. La interacción simbiótica es la materia prima de la vida sobre un planeta superpoblado. Nuestra esencia compuesta y simbiogenética es mucho más antigua que la reciente innovación a la que llamamos individuo humano. Nuestro fuerte sentido de la diferencia con cualquier otra forma de vida, nuestro sentido de superioridad como especie, es una ilusión, un delirio de grandeza.

Esta ilusión, sospecho, evolucionó de la necesidad de «reconocimiento como especie». Sentimos la necesidad y la pulsión de criar y producir más personas. Esta permanencia en el campo de juego evolutivo exige que reconozcamos a parejas potenciales de nuestra propia especie. Sin embargo, este autoenfoque sexual oculta la más grande verdad simbiogenética de nuestra composición multiespecífica. La multicomposición es nuestra naturaleza.

La ironía zoológica es que la comprensión de la evolución del sexo animal requiere el conocimiento de los protoctistas. Pero los protoctistas, frecuentemente confundidos con animales en miniatura, raramente son estudiados por los biólogos profesionales. Sufren una indignidad todavía mayor que la de las bacterias demonizadas como gérmenes de enfermedades: los protoctistas son ignorados. La mayoría de la gente ha oído hablar de las bacterias, incluso aunque sólo sea en un contexto de

aerosoles letales, polvos venenosos y soluciones antisépticas. De entre unas 250 000 especies estimadas de protoctistas vivos, sólo unas pocas (las amebas, los hongos mucosos, las algas verdes y los ciliados) tienen siquiera nombre. Incluso ellas son meras curiosidades para las clases de biología.

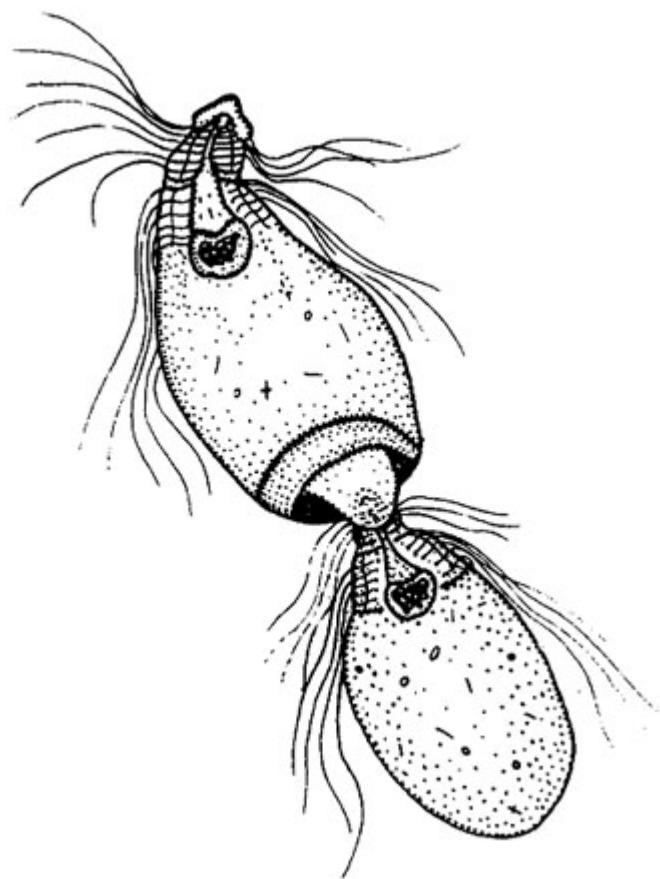


Figura 7. Protistas apareándose. El canibalismo abortado en los protoctistas unicelulares dio como resultado una tregua llamada sexo. Aquí dos individuos de *Trychonympha* de género complementario se aparean. La hembra, con su anillo de fertilización, es penetrada por el macho por la parte posterior.

Los animales y las plantas deben atraerse sexualmente y fusionar sus núcleos para formar embriones. El sexo no es opcional para ellos. Pero muchos protoctistas nunca jamás se permiten una relación sexual y les va muy bien, se reproducen sin cesar.

Mientras Samuel Roscoe Cleveland era catedrático de biología en la Universidad de Harvard, publicó en la revista *Science* una teoría muy clara que resolvía el problema del origen de nuestra clase de sexo meiótico. A medida que estudiaba protoctistas vivos y contemplaba sus debilidades, sus torpezas y sus errores graves, se dio cuenta de que la fertilización comenzó como un accidente producto de la desesperación. El sexo meiótico, como estrategia de supervivencia, apareció como consecuencia de la indigestión caníbal. Cleveland observó extrañas tensiones en comunidades al borde de la muerte: un mastigóforo que parecía estar muerto de hambre devoraba a su vecino; otro escapaba rápidamente de un potencial depredador hambriento. Cleveland se dio cuenta de que estaba observando canibalismo abortado. Algunos caníbales se comían y digerían hasta el último apéndice celular de sus hermanos-víctimas. Otros sufrían indigestión y dejaban de lado el núcleo y los cromosomas de su pretendido almuerzo. Las dos células fusionadas formaban una nueva célula única con dos núcleos y dos juegos de cromosomas. Cleveland, viviendo diariamente en este microcosmos, reconoció la tregua caníbal final. Se fijó en que dos de esos núcleos situados muy cerca se fusionaron. Esto era algo más que canibalismo abortado. Cleveland lo reconoció como el equivalente formal de la fertilización^[38].

El complemento a las fusiones de fertilización es la disociación. La disociación sexual requiere meiosis. El sexo meiótico, el sexo «animal» —que también tiene lugar en muchos protoctistas, todas las plantas y la mayoría de los hongos— es el conjunto completo de procesos que dividen por la mitad el número de cromosomas por célula mediante divisiones celulares especiales. En la meiosis —normalmente dos divisiones— los dos juegos de cromosomas por célula se reducen a uno solo. Las llamadas células haploides están entonces listas para detectar, aparearse y fusionarse con otras células haploides para crear embriones diploides.

Por supuesto, los protoctistas no fotosintéticos, opten o no por el sexo, siempre comen. Algunos comerán cualquier cosa en condiciones de estrés. Si se les somete a desecación, hambre, irradiación o se les expone a

cualquier otra forma de peligro inminente de muerte se fusionarán, en un intento de salvarse comiéndose a sus compañeros, en vez de morir solos.

Muchos protoctistas de agua dulce se aparean estacionalmente antes de morir. Los productos del apareamiento —zigosporas, histicosferas u otras células con juegos dobles de cromosomas— suelen tener unas paredes lo suficientemente resistentes como para sobrevivir al invierno o a la estación seca. Al principio, las robustas células dobles no crecen; en vez de ello protegen sus genes y otras partes de la célula durante los veranos secos, los inviernos gélidos y otras épocas difíciles.

La supervivencia mediante duplicación comenzó como una respuesta a las amenazas medioambientales. ¿Cómo sucedió esto? Si uno se comiera a su vecino, sin duda un ser bastante parecido genéticamente, pero no lo digiriera completamente, en un encuentro comparativamente rápido podría casi doblar su tamaño. Como este humano hinchado, un protoctista atiborrado al filo de los malos tiempos, con sus dos juegos de cromosomas y el doble de fluido citoplásmico, podría ser capaz de soportar mejor las privaciones. Pero, en general, duplicar el cuerpo, especialmente el número de cromosomas, es un estorbo. Probablemente uno desearía que le aliviaran de su estado de doble monstruosidad. El estado original protoctista es «haploide», que significa un organismo dotado de un solo juego de cromosomas. Una apabullante diversidad de protoctistas habían evolucionado desde hace mucho tiempo en estado haploide. El juego doble de cromosomas, ventajoso durante las épocas difíciles, era problemático. Necesitaban volver al *status quo* haploide.

El sexo de fertilización meiótica apareció probablemente por primera vez hace mil millones de años. Pero, como señaló Cleveland, el sexo meiótico entre dos progenitores evolucionó sólo después de la diploidía «aliviada» por la reducción-división de la meiosis. El propio comer-aparearse creó una indigestión irreversible. A medida que los haploides se comían entre sí se convertían en diploides, que se comían entre sí convirtiéndose en tetraploides, después octoploides y así sucesivamente. Los cromosomas y la hinchaón proliferaron. Las células dobles con sus cromosomas y otros orgánulos adicionales se ralentizaron e incluso

detuvieron sus actividades diarias. El síndrome de Down es una de las muchas enfermedades genéticas humanas causadas por un cromosoma o un trozo de cromosoma adicional y nos advierte de los peligros del desequilibrio cromosómico. Aun así hoy en día muchas plantas y animales no mamíferos toleran cromosomas y juegos de cromosomas adicionales. Los cultivadores de iris siberianos, *Hemerocallis* y muchas otras plantas tratan las semillas con compuestos químicos que inhiben la formación de los microtúbulos del huso mitótico y generan células más grandes con cromosomas adicionales. A partir de esas semillas se pueden generar flores bellas y vistosas. Inspiran admiración y beneficios; y algunas continúan propagándose en la deseable forma alterada. Antes de que el sexo se convirtiera en un ritual, los cromosomas y los juegos de cromosomas adicionales podrían ser triviales, tolerados, debilitantes, peligrosos o fatales. Todo dependía, como siempre, de las contingencias genéticas y medioambientales. Como recalcó Cleveland, la diploidía tuvo que ser revertida si los protoctistas dobles querían volver a su funcional estado haploide.

Según el análisis de Cleveland, el primer paso hacia la meiosis fue deshacerse de los cromosomas adicionales adquiridos gracias al canibalismo. La meiosis, que produce espermatozoides, óvulos o esporas vegetales haploides, reduce a la mitad el número de cromosomas. Como proceso opuesto a la fertilización, la meiosis convierte a los diploides en haploides. El refinamiento final en el origen del sexo meiótico fue la mejora del proceso de duplicación/división de manera que tuviera lugar en el momento justo y sin fallos.

Gracias a la prodigiosa perspicacia de Cleveland, la comprensión de la evolución de la meiosis me resulta sencilla. Desde mi punto de vista el propio aparato mitótico evolucionó a partir de esa antigua fusión espiroqueto-arqueobacterial. Los vestigios vivos de las espiroquetas-arqueobacterias hace tiempo se fusionaron felizmente para actuar de manera coordinada. Pero no se puede contar con seres que una vez fueron independientes para cooperar indefectiblemente. Su ascendencia se

evidencia cuando ocasionalmente dejan deslizar un desafiante acto de reproducción según su propio calendario.

El sexo meiótico evolucionó adecuadamente en varios linajes de prototistas. Los ancestros se vieron inmersos en los ciclos estacionales de fusión y alivio del apareamiento y la meiosis. Cuando el alimento, el agua u otras necesidades de los seres vivos eran escasos, el «proto-apareamiento» caníbal les arreglaba el día. Las carencias conducían a la fusión y a la supervivencia en el modo doble. Sin embargo, cuando el entorno era relativamente propicio, la más antigua, funcional y rápida organización celular haploide era seleccionada naturalmente.

El sexo, como la simbiosis, es una cuestión de fusión. Pero también es una cuestión de huida periódica de esa fusión. El sexo puede ser entendido como un caso muy especial de simbiosis cíclica: tanto el sexo (los óvulos fertilizados o zigotos) como la simbiosis, la fusión de socios simbióticos, producen nuevos seres. El acto de aparearse (excepto en *Schistosoma*, gusanos tremátodos colocados permanentemente en posición copulatoria mientras producen abundantes huevos fértiles) tiende a ser breve. En las fusiones sexuales animales y vegetales el nuevo ser es relativamente duradero con respecto al propio momento del apareamiento. En las simbiosis cíclicas, como las de los peces luminosos, las bacterias fijadoras de nitrógeno y los hongos que proporcionan fosfato a las raíces de las plantas, los seres fusionados también duran más que los socios separados. Pero la simbiosis celular es un nivel de fusión más profundo, más permanente y único. En las grandes simbiosis celulares, las de trascendencia evolutiva que condujeron a los orgánulos, el acto de apareamiento es, a efectos prácticos, para siempre.

7. TIERRA ADENTRO

El Sol sería superfluo
Si la Excelencia hubiera muerto (999)^[VIII]

Hasta que visité hace poco la exposición conmemorativa de *Star Trek*^[39] en el Museo Smithsonian del Espacio y el Aire en Washington, nunca había visto ni un solo episodio de esta serie. Durante diez minutos, una indolente curiosidad y la nostalgia por los setenta, junto con la multitud a mi espalda me indujeron a contemplarlo: muy estadounidense y plagado de fechas. Su estupidez me impactó. Encontré estrañaria la falta de plantas, el paisaje mecanizado y, en el vehículo espacial, la ausencia de todas las formas de vida no humanas. Si algún día llegan a pasear en naves espaciales gigantescas hasta otros planetas, los humanos no estarán solos. En el espacio como en la Tierra, los elementos de la vida —el carbono, el oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre y el fósforo y unos cuantos más— deben ser reciclados. Este reciclaje no es un lujo de barrio residencial; es un principio vital del cual no puede librarnos ninguna tecnología. Los viajes humanos al espacio profundo requieren ecosistemas compuestos de muchos organismos no humanos que reciclen los residuos y los transformen en alimento. En ausencia de «los servicios del ecosistema» sólo serán posibles escapadas muy breves en contacto constante con la madre Tierra.

Un ecosistema es la unidad más pequeña capaz de reciclar los elementos de importancia biológica. El dióxido de carbono es «fijado», es decir, convertido químicamente en alimento y cuerpo (carbono orgánico). El carbono orgánico es respirado, reacciona, es degradado o transformado en diferentes tipos de materia orgánica. Con el tiempo, la enzima o la

aspiración profunda de alguien hace reaccionar ese carbono orgánico para liberar CO₂ a partir de él. Así funciona el ciclo del carbono. Lo mismo se puede decir del nitrógeno a medida que viaja desde el escurridizo N₂ de la atmósfera, a través de los «fijadores de nitrógeno», hasta el N útil de los aminoácidos. Cuando los aminoácidos que han sido liberados de las proteínas son convertidos en residuos nitrogenados y después en el N₂ gaseoso del aire, se dice que el ciclo del nitrógeno se ha completado. Los elementos circulan más rápidamente dentro de los ecosistemas que fuera de ellos pero ningún compuesto químico está totalmente aislado. Prefiero la idea de que la Tierra es una red de «ecosistemas» a cualquier personificación de la Madre Gaia. Mi colega Daniel Botkin definiría probablemente cualquier ecosistema como un conjunto de comunidades de diferentes especies de organismos que viven en el mismo lugar al mismo tiempo y que disfrutan de un flujo interno de energía y materia externas. Él afirmaría, y yo estoy de acuerdo, que un ecosistema es un volumen de superficie terrestre en el que hay organismos que reciclan energía y materia con más rapidez dentro del sistema que entre él y otros sistemas. En cualquier ecosistema, las necesidades de materia y energía de los organismos se cubren mediante el reciclaje de todos los muchos compuestos químicos necesarios para el mantenimiento de la vida. Para «reverdecer» Marte, colonizar otros planetas o vivir períodos prolongados en el espacio se necesitará mucho más que simples máquinas y colonos humanos. Requerirá comunidades organizadas y eficientes. La vida en común será tan crucial para la colonización del espacio exterior como lo fueron la simbiosis y la diversidad para la colonización de la tierra seca en la era paleozoica. La vida en el espacio, si ha de tener lugar, exigirá alianzas físicas, incluyendo nuevas simbiosis, entre formas de vida diferentes.

Las nuevas simbiosis, forjando nuevos patrones de interacción, ya han sido cruciales en la colonización de partes importantes de la Tierra. Los habitantes terrestres podrían deber su control de la tierra seca a simbiosis específicas entre plantas y hongos.

Las raíces de las plantas y los hongos crecen juntos formando nódulos en las raíces llamados micorrizas (Figura 5). Juntos, los complejos hongo-planta se establecieron sobre inhóspitos regolitos secos: arena, tierra y guijarros.

La vida evolucionó en el mar, pero la argumentación de que sólo la intervida —la simbiogénesis— hizo posible que la vida colonizara la tierra seca nueva y hostil tiene mucha fuerza. La radiación solar ultravioleta, la devastadora desecación y la escasez de nutrientes en tierra eran problemas mucho más serios hace 500 millones de años de lo que lo son ahora.

La simbiogénesis desarrolló la tierra firme de nuestro planeta hasta convertirla en bienes inmuebles ocupables. Es muy probable que las tempranas simbiosis interiores no fueran bacterianas. Los organismos terrestres de tamaño grande más antiguos que dejaron un registro fósil fueron probablemente complejos planta-hongo. Los fósiles vegetales más antiguos del mundo aparecen en el esquisto, un tipo de roca llamada popularmente pedernal negro. El esquisto más rico en plantas fósiles procede de una cantera cerca de Rhynie, en Escocia. Se cree que los fósiles de Rhynie han conservado tan exquisitamente cada uno de sus detalles gracias al flujo de agua que penetraba desde un arroyo termal cercano rico en sílice. Entre los tesoros del esquisto de Rhynie hay quítridos fósiles, una clase de protocista, que aparecen en el interior de algas fosilizadas. ¡Las algas mismas viven dentro del tallo de plantas de 400 millones de años de antigüedad! La calidad de las instantáneas de la más temprana vida sobre la tierra que nos proporcionan estos fósiles es impresionante. Un insecto conservado intacto en el esquisto de Rhynie llevaba en sus entrañas la clamidospora de un hongo. (Este extravagante nombre hace referencia a una estructura resistente al frío y a la desecación. Las clamidosporas son propágulos formados, sin ninguna clase de sexo, por partición de los filamentos de los hongos).

Los botánicos canadienses K. A. Pirozynski y D. W. Malloch proponen la idea de la «fusión fúngica» para ayudar a explicar el origen de las plantas hace 450 millones de años. Plantean la hipótesis de la coevolución de hongos y algas en simbiogénesis: como socios combinados. Con el tiempo

las plantas proporcionaron savia a los hongos que tenían en su interior, cuyos filamentos miceliales desarrollaron una fuerte ramificación y raíces. Peter R. Astatt, de la Universidad de California, en Irvine, amplía la hipótesis Pirozynski-Malloch señalando que las plantas rompen las paredes de celulosa de sus células utilizando trucos degradativos y de absorción característicos de los hongos. Tanto los hongos como las plantas, por ejemplo, excretan al suelo la enzima quitinasa. Astatt sostiene que durante su larga asociación con los hongos, las plantas robaron y retuvieron genes fúngicos.

Las micorrizas actuales son estructuras simbióticas inflamadas, distintivas y reconocibles. Frecuentemente coloridas, se forman simbiogenéticamente mediante la interacción de hongos y el tejido de las raíces de las plantas. Las micorrizas proporcionan a su socio vegetal nutrientes minerales, suministrándole el fósforo y el nitrógeno del suelo. La planta proporciona a su socio fúngico savia, es decir, alimento fotosintético. Los hongos de las micorrizas actuales forman clamidosporas increíblemente parecidas a las que se encontraron en los antiguos fósiles. En el esquisto de Rhynie aparecen incluso restos vegetales de 450 millones de años de antigüedad, incluyendo a la propia *Rhynia*, que tienen las raíces inflamadas. Las plantas y los hongos ya estaban comprometidos en simbiosis productivas desde el mismo comienzo de su vida sobre la tierra seca.

El traslado a tierra fue sinónimo de evolución de las plantas a partir de algas moradoras del agua. La supervivencia sobre la tierra requería fortaleza: fuerza, resistencia a la desecación y una nutrición adecuada. Astatt, que aún no ha convencido a sus colegas, afirma que estas grandes discontinuidades desde el hábitat ancestral de las algas exigieron que las algas y los hongos se asociaran en simbiosis. Las algas verdes, flotando al borde del océano, no crecieron simplemente de tamaño y un día se convirtieron en plantas.

Los valles desiertos de Victoria Land, en la Antártida, son un infierno helado. Ráfagas de viento soplan periódicamente sobre la roca e instantáneamente congelan el hielo derretido del verano. Sin embargo, escondidas dos o tres milímetros bajo la roca, prosperan comunidades de

líquenes, una mezcla simbiótica de hongos, algas y bacterias que habitan incluso la arenisca porosa. Esta comunidad sobrevive siempre que reciba luz del sol a través de los gránulos cristalinos del cuarzo. Una estimación del peso global de estos hongos-líquenes moradores de la roca es de 13×10^{13} toneladas, ¡una biomasa más grande que la de toda la vida oceánica! Las algas que crecen bajo la cubierta protectora de hongos se aferran a la pura roca, se extienden sobre la superficie y con el tiempo la desmenuzan hasta formar suelo que puede ser penetrado por las raíces de las plantas y las retículas de las hifas de los hongos. Como resultado de las asociaciones hongo-alga, la roca dura de este planeta rotatorio ha estado desmigajándose durante cientos de millones de años, produciendo suelo rico y nutritivo. Los líquenes también desempeñan un papel principal en los climas templados, haciendo el terreno habitable para la vida.

Durante miles de millones de años, la vida, en lo que los McMenamin llaman el «hipermar»^[40], extendió sus dominios desde su hogar acuático hasta la tierra seca. Con elegancia, novedad y un éxito impactante, la vida se expandió hasta lugares a los que nunca antes había llegado. Hoy el número y la diversidad de especies sobre la tierra y las interconexiones que existen entre ellas exceden a las del mar, que fue el hábitat original de la vida. La biomasa de la vida sobre la tierra es cientos, si no miles, de veces más grande que la biomasa de la vida marina. Gran parte de esta enorme presencia, una estimación del 84 por ciento, corresponde a los árboles. La forestación de la Tierra, la dramática expansión de la vida más allá de su útero oceánico, implicó una dramática reestructuración del medio ambiente terrestre. Para los fotosintetizadores, en tierra había poco suministro de nutrientes como el sulfato y el fósforo que sin embargo flotaban libremente en el agua, el sistema circulatorio externo de los océanos. Estos nutrientes tuvieron que ser canalizados por la propia red del hipermar. El traslado a tierra conllevó una nueva arquitectura e infraestructura.

Allí donde había vida, el agua fluía a través de ella. El citoplasma es agua en más de un 80 por ciento. Mark McMenamin y su esposa, la paleontóloga Dianna McMenamin, utilizan el pegadizo nombre «hipermar» para llamar la atención sobre las profundas consecuencias de las

interconexiones simbiogenéticas. A lo que los McMenamin se refieren con hipermar es, a grandes rasgos, el sistema de raíces de las plantas que depende de las micorizas de los hongos. Se puede reconocer por su nombre a casi quinientos tipos de micorizas simbiontes, los hongos enredados en los pelos radiculares de las plantas. Las plantas vasculares, de las cuales *Rhynia* es un temprano ejemplo, incluyen a todos los vegetales excepto los musgos, las hepáticas y unas cuantas especies más que tapizan los suelos húmedos. Las plantas vasculares tienen sistemas circulatorios. Son capaces de bombear agua desde el suelo hacia sus tallos y hojas y de distribuir el producto fotosintético (alimento) en sentido contrario. Sus conexiones subterráneas microscópicas y micorizales son invisibles e inapreciadas; el literal funcionamiento «bajo cuerda» de estas asociaciones explica el prodigioso éxito de las plantas que vemos.

Aunque globalmente son importantes, los hongos de las micorizas sólo atraen la atención ocasionalmente, por ejemplo, cuando forman trufas. Estas exquisitezces italianas y francesas son las partes reproductivas formadoras de esporas de ciertos hongos micorizales aromáticos, un manjar para los perros y los cerdos, que son capaces de detectarlas mediante el olfato en las raíces de los árboles de madera dura. Las plantas que tienen micorizas en sus raíces son seleccionadas naturalmente: en suelos deficientes en nutrientes producen semillas más pesadas, con mayores reservas de nitrógeno y fósforo que sus homólogas no vinculadas a los hongos. De hecho, el 90 por ciento de las plantas vivas tienen simbiontes micorizales, y cerca del 80 por ciento de ellas perecerían si fueran privadas de sus socios fúngicos. El hipermar reina.

El concepto de los McMenamin necesita tanta valoración crítica como elogio crítico. El minerólogo ruso Vladimir Vernadsky (1863-1945) reconocía que la vida era la más grande fuerza geológica. Anticipándose al hipermar, llamó a la materia viva «agua animada». Agua animada es una excelente descripción de la vida^[41].

Las plantas se trasladaron a la tierra recreando su ambiente húmedo y sellándolo dentro de sí mismas. Los árboles son prolíficos expertos en sellar agua en su interior, trasladarla a la tierra y controlar su evapotranspiración.

Con sus redes ramificadas de tejido reforzado por celulosa y lignina, los árboles son por supuesto plantas vasculares. La lignina es una compleja combinación de compuestos químicos de carbono polifenólico que da a la madera su dureza. La aparición de los árboles, hace cerca de 400 millones de años, estimuló el crecimiento de la biosfera hacia arriba y hacia afuera. La gran expansión sobre la tierra hacia arriba y hacia afuera del mar y del agua dulce estuvo basada en la intimidad entre las plantas y los hongos, y todavía lo está. Los hongos ocupan un lugar preeminente en el reino de los moradores de la tierra. Nunca fotosintéticos, obtienen su alimento mediante absorción. Siempre carecen de ondulipodios, así que sus células nunca nadan. Pero ¡vaya, pueden sobrevivir a la desecación temporal! Los hongos tienen una paciencia que excede con mucho a la de cualquier santo. Se sientan y esperan, y cuando la humedad vuelve a aparecer retoman el control. La mayoría de los hongos forman intrincadas redes miceliares, engranajes de tubos de alimentación llenos de citoplasma. Solos, coordinados con algas en forma de líquenes, o con plantas en forma de micorrizas, conquistaron la tierra y se multiplicaron.

La simbiogénesis fue la luna que atrajo a la marea de la vida desde las profundidades oceánicas hasta la tierra seca y el aire. La red de agua sobre la tierra, el agua animada de los hongos en las plantas, es el hipermar de los McMenamin. Si la gente viaja alguna vez al espacio exterior, la empresa nunca será tan mecanizada y yerma como *Star Trek*. La visión de ingeniería estéril emancipándonos de nuestros compañeros de planeta no sólo es aburrida e insípida, sino que bordea lo espantoso. No importa lo mucho que nos preocupe nuestra propia especie, la vida es un sistema mucho más amplio. Es una increíble y compleja interdependencia de materia y energía entre millones de especies fuera (y dentro) de nuestra propia piel. Estos alienígenas de la Tierra son nuestros parientes, nuestros ancestros y parte de nosotros. Ellos hacen funcionar los ciclos de la materia y nos traen agua y alimento. Sin «los otros» no sobreviviríamos. Nuestro pasado simbótico, interactivo e interdependiente está conectado a través de aguas animadas.

8. GAIA

No hay Silencio en la Tierra —tan silenciosa
Mientras este perduró.
Aquello que lo emitiera, desalentaría a la Naturaleza
Y Aterrorizaría al Mundo (1004)^[IX]

La propiocepción, la percepción del movimiento y la orientación espacial que surge a partir de estímulos de dentro del cuerpo, es un concepto médico. Aunque su nombre no es muy conocido este fenómeno nos resulta a todos muy familiar. Nuestros propioceptores nos informan constantemente de que estamos de pie, inclinando la cabeza, entrecerrando los ojos o apretando los puños. Los propioceptores no trabajan como sistemas sensoriales para la información de fuera, sobre otros o sobre el entorno, sino para la de dentro del cuerpo. Los nervios unidos a los músculos se disparan cuando detectan movimientos como un cambio en la posición del cuerpo. Estos nervios de autocontrol nos dicen si estamos de pie o boca abajo, si estamos parados en el autobús o nos movemos a cincuenta kilómetros por hora. La Tierra ha disfrutado de un sistema propioceptor durante milenarios, desde mucho antes de que los humanos evolucionaran. Los pequeños mamíferos se comunican entre sí el terremoto que se avecina o la cercanía de un chaparrón. Los árboles liberan «volátiles», sustancias que advierten a sus vecinos de que larvas de polilla podrían atacar sus hojas. La propiocepción, el sentirse a uno mismo, es probablemente tan vieja como el propio ser uno mismo. Me gusta pensar que las personas aumentamos y continuamos acelerando la nueva capacidad propioceptora moderna de Gaia. Un incendio en la selva de Borneo y el accidente de un helicóptero norteamericano en los Alpes italianos son retransmitidos en el telediario de

la ciudad de Nueva York. Aun así, las manadas de lobos y los rebaños de dinosaurios extinguidos ya disfrutaban de su propia comunicación social propioceptora; ciertamente, el sistema nervioso global no comenzó con el origen de las personas. Gaia, la Tierra fisiológicamente regulada, disfrutaba de comunicaciones proprioceptoras globales mucho antes de que nosotros evolucionáramos. El aire hacía circular emisiones de gases y compuestos químicos solubles procedentes de los árboles tropicales, de los insectos listos para aparearse y de las bacterias amenazadas de muerte. Los compuestos amorosos han aromatizado las brisas primaverales desde la era Arcaica. Pero la velocidad de la propiocepción ha aumentado enormemente con la era electrónica.

La segunda conferencia Gaia, «Gaia en Oxford», que tuvo lugar en Inglaterra en abril de 1996, reunió a científicos y activistas medioambientales para discutir sobre superorganismos. ¿Constituye toda la vida terrestre un superorganismo? ¿Es la vida una única entidad autorregulada llamada Gaia? ¿Incita la insistencia en el superorganismo nociones de armonía planetaria reconfortantes pero sin justificación científica alguna?

Estas ideas circularon y fueron discutidas por casi cuarenta participantes, que llegaron a una sola conclusión: la decisión de fundar la Sociedad Geofisiológica en la Universidad de East London. Para mi regocijo esta decisión fue revocada a finales de 1997: Gaia vive; la geofisiología ha muerto. Ahora la nueva organización se autodenomina Gaia: La Sociedad para la Investigación y Educación en la Ciencia del Sistema Tierra. Gaia, la sociedad científica, fue presentada el 9 de febrero de 1998 en los cuarteles generales de la Royal Society en Londres. E. O. Wilson, biólogo, experto mundial en biodiversidad y especialista en hormigas, su comportamiento social y sus habilidades tecnológicas, envió una cinta de vídeo con su enhorabuena. Que la inauguración formal se hiciera en la más antigua y más reverenciada sociedad científica del mundo fue para la teoría Gaia un maravilloso respaldo. La felicitación televisada de un catedrático de Harvard muy respetado que representaba a los simpatizantes de Gaia en su lado del Atlántico fue también una hábil

jugada. La cada vez mayor comunicación entre los colaboradores potenciales de la ciencia gaiana sólo puede estimular la conciencia de la magnitud de nuestra ignorancia acerca de la superficie de la Tierra, de la cual dependemos tan crucialmente.

La hipótesis Gaia no es, como muchos afirman, «que la Tierra es un único organismo». Sin embargo la Tierra, en el sentido biológico, tiene un cuerpo mantenido por procesos fisiológicos complejos. La vida es un fenómeno a nivel planetario y la Tierra ha estado viva durante al menos 3000 millones de años. Desde mi punto de vista, el movimiento humano que pretende responsabilizarse de la Tierra viviente es hilarante, la retórica del impotente. El planeta cuida de nosotros, no nosotros de él. El arrogante imperativo moral que nos empuja a tratar de guiar a una Tierra caprichosa o de curar a nuestro planeta enfermo es una prueba de nuestra inmensa capacidad para el autoengaño. Más bien necesitamos protegernos de nosotros mismos.

La figura central de la conferencia de 1996 fue James Lovelock, el autor de la hipótesis Gaia. Lovelock fue el primero en afirmar, a principios de los años setenta, que la suma total de la vida optimiza el medio ambiente para su propio uso. Los biólogos se resintieron por la palabra *optimiza*. ¿Cómo podría la Tierra planear algo?, censuraron. A mediados de los sesenta, años antes de que yo le conociera, Lovelock ya había esbozado la idea de la Tierra viviente mientras trabajaba como asesor de la NASA ayudando a encontrar formas de detectar la vida en Marte. Jim se dio cuenta de que la vida en cualquier planeta tendría que utilizar sus propios fluidos —que en la Tierra serían la atmósfera, los océanos, los lagos y los ríos— para hacer circular los elementos que necesita. Los nutrientes tendrían que ser suministrados y los residuos eliminados. La química de un planeta con vida, razonó, debe diferir marcadamente de la de uno sin ella. Se dio cuenta de que las contradicciones químicas de la atmósfera terrestre son detectables incluso desde el espacio exterior. Nuestra atmósfera contiene demasiado oxígeno en presencia de metano. Estos gases, altamente reactivos cuando están mezclados, no podrían coexistir en concentraciones tan elevadas a menos que los niveles fueran mantenidos activamente. Además abundan

otros gases en una proporción totalmente inverosímil y en una mezcla altamente inestable. El hidrógeno e incluso el nitrógeno reaccionan explosivamente en presencia del oxígeno y sin embargo coexisten en la atmósfera de la Tierra. Cuando Lovelock se enfrentó por primera vez a la tarea de detectar la vida marciana, los análisis que provenían de los telescopios situados en la superficie de Marte ya habían mostrado que este planeta, a diferencia de la Tierra, disfruta de una atmósfera estable de gases no reactivos. Lovelock infirió correctamente que la vida no podía existir en Marte. Por supuesto, la misión *Viking*, en su intento de detectar vida actual, voló a Marte de todas formas. Mi opinión es que cuando en 1976 la sonda *Viking* transmitió sus datos a la Tierra, sólo confirmó la predicción de Lovelock basada en la teoría Gaia.

Los pensamientos de Lovelock se volvieron hacia nuestro planeta. Jim, un científico independiente tan aislado como libre de la corriente académica preponderante, acometió la persecución de sus intereses a su manera. Es un prolífico inventor; su principal contribución es el mecanismo de captura de electrones, un detector unido a un instrumento llamado cromatógrafo de gases que sirve para medir la concentración de ciertos gases reactivos en el aire tales como los clorofluorocarbonados. El equipo de Lovelock fue rediseñado y masivamente comercializado por Hewlett-Packard. Este instrumento permitió a Sherwood Rowland y Mario Molina, del MIT, recibir en 1995 el premio Nobel de química por mostrar cómo reaccionan los gases de los aerosoles destruyendo la capa estratosférica de ozono. Otros logros de Jim incluyen la reivindicación de las afirmaciones de Rachel Carson sobre el penetrante impacto de los pesticidas que trajo a la atención del país en su libro *Silent Spring* (*Primavera silenciosa*). Mientras trabajaba en criogenia, biología de bajas temperaturas, para el Medical Research Council (MRC) británico, Jim desarrolló un método para congelar y descongelar animales y sus espermatozoides. Descongeló especímenes en una cámara de su construcción, una especie de horno microondas (sin embargo, no patentó su invento; patentar, un proceso largo y costoso, es algo confuso y altamente social; exactamente la clase de actividad que Lovelock evita a toda costa).

Cuando Jim se interesó en cómo la vida afectaba a la atmósfera terrestre, prosiguió con sus investigaciones sin ayuda o subvención institucional. Simplemente encerró y midió gases a sus expensas. Nunca cesó de comunicarse con colegas y estudiantes. El resultado de su incesante actividad fue el desarrollo de la teoría Gaia.

Empezamos a mantener correspondencia a principios de los setenta. En una de sus primeras respuestas a mis cartas, Jim me comentó que estaba desconcertado con el metano. ¿Por qué este gas, que reacciona tan fuertemente con el oxígeno, está siempre presente de manera perceptible en la atmósfera de la Tierra? Debería desaparecer. Sospechando desde el principio que esto tenía que ver con la vida, me preguntó si yo sabía quién o qué podía producir este gas. Le respondí como lo habría hecho cualquiera que leyera textos de microbiología. El gas metano es producido por las bacterias, principalmente por los metanógenos que viven en suelo anegado o en el rumen del ganado. El producto metabólico de las bacterias metanogénicas es liberado en copiosas cantidades no por las flatulencias de las vacas (como yo siempre había pensado), sino por sus eructos. Este gas es expulsado al aire a través de las bocas de las vacas, los toros y los terneros. El metano atmosférico reacciona rápidamente con el oxígeno para producir dióxido de carbono. Evidentemente, el metano del aire es reabastecido de forma regular porque siempre está presente en concentraciones que varían entre dos y siete partes por millón. Lovelock se dio cuenta de que las concentraciones atmosféricas de metano debían estar reguladas por la vida. Era probable entonces que existieran también otros ejemplos de regulación de gases.

Las pistas geológicas sugieren que nuestro planeta se ha ido enfriando durante los últimos tres mil millones de años. Los astrónomos insisten en que el sol, una estrella típica, se ha vuelto más brillante. El sol debería haber ido calentando cada vez más la superficie de la Tierra durante este inmenso lapso de tiempo pasado. La regulación de la temperatura y de la atmósfera, razonó Jim, debe tener lugar a escala global. A medida que se daba cuenta de que estas condiciones vitales del medio ambiente parecían

ser controladas activamente, se reafirmaba más en su propuesta de que la vida mantiene su atmósfera.

Tomando prestado un término de fisiología, Lovelock llegó a la conclusión de que nuestro medio ambiente planetario es homeostático. De la misma forma que nuestro cuerpo, como el de todos los mamíferos, mantiene una temperatura interna relativamente estable a pesar de las condiciones cambiantes, el sistema de la Tierra mantiene constantes su temperatura y su composición atmosférica. En términos de ingeniería, escribió Lovelock, la temperatura atmosférica es regulada mediante retroalimentación negativa dentro de unos niveles establecidos dados. Sus afirmaciones de que «la vida fija la temperatura medioambiental en un punto óptimo» fueron malinterpretadas, criticadas o, con más frecuencia, ignoradas. Lovelock estaba cada vez más convencido de que este sistema de regulación planetario era fundamental para comprender la vida sobre la Tierra^[42].

El novelista William Golding, autor de *Lord of the Flies* (*El señor de las moscas*), sugirió a Lovelock el nombre de Gaia. A principios de los años setenta ambos vivían en Bowerchalke, Wiltshire, Inglaterra. Lovelock le preguntó a su vecino si podría reemplazar la farragosa y torpe frase «un sistema cibernetico con tendencias homeostáticas como las que se detectan en las anomalías químicas de la atmósfera terrestre» por un término que significara «Tierra». «Necesito una buena palabra de cuatro letras», le dijo. Durante sus paseos alrededor de la campiña de esa maravillosa parte del sur de Inglaterra, cerca de las colinas de yeso, Golding le sugirió Gaia. La antigua palabra griega para «Madre Tierra» constituye la raíz etimológica de muchos términos científicos, tales como geología, geometría y Pangea.

El nombre ganó demasiada popularidad. Los ecologistas y las personas religiosas, atraídos por la idea de una poderosa diosa nativa, se agarraron a él dando a Gaia una connotación distintivamente a científica. Justo antes de la reunión de Oxford de 1996 Jim propuso el término *geofisiología* para el estudio de la superficie planetaria como un cuerpo parecido a un organismo en el cual la geología y la biología están «fuertemente emparejadas», es decir, íntimamente ligadas.

Muchos científicos todavía muestran hostilidad hacia Gaia, tanto a la palabra como a la idea, quizá porque suena mucho a cuentos populares anticientíficos y antiintelectuales. En la cultura popular, en la medida en la que este término sea familiar, hace referencia a la noción de la Madre Tierra como un único organismo. Gaia, una diosa viva fuera del alcance del conocimiento humano, supuestamente nos castigará o nos recompensará por nuestros insultos o bendiciones medioambientales a su cuerpo. Lamento esta personificación.

Como Jim señala en su teoría sobre el sistema planetario, Gaia no es un organismo. Cualquier organismo debe comer o producir su propio alimento mediante fotosíntesis o quimiosíntesis. Todos los organismos producen residuos. La segunda ley de la termodinámica habla claramente de ello: para mantener su organización, un cuerpo debe perder energía, disipada en forma de calor. Ningún organismo se alimenta de su propio residuo. Gaia, la Tierra viviente, trasciende en mucho a cualquier organismo concreto o incluso a cualquier población. El residuo de un organismo es el alimento de otro. Incapaz de distinguir entre el alimento de alguien y el residuo de algún otro el sistema gaiano recicla la materia a nivel global. Gaia, el sistema, emerge a partir de diez millones o más de especies vivientes conectadas que forman su cuerpo incesantemente activo. Lejos de ser frágil o conscientemente irritable, la vida planetaria tiene una enorme capacidad de recuperación. Mientras obedecen ciegamente la segunda ley de la termodinámica, todos los seres buscan fuentes de alimento y energía. Todos producen calor y residuos químicos inservibles. Éste es su imperativo biológico. Cada uno crece y, mientras lo hace, presiona a muchos otros a su alrededor. La suma de la vida planetaria, Gaia, exhibe una fisiología que nosotros reconocemos como regulación medioambiental. Gaia misma no es un organismo directamente seleccionado entre muchos. Es una emergente propiedad de interacción entre los organismos, el planeta esférico sobre el que residen y una fuente de energía, el sol. Gaia es además un fenómeno antiguo. Los billones de seres que pugnan, se alimentan, se aparean y excretan componen su sistema planetario. Gaia, una perra vieja, no está en absoluto siendo amenazada por los humanos. La vida planetaria sobrevivió

por lo menos tres mil millones de años antes de que la humanidad fuera siquiera el sueño de un simio lúcido que deseaba una compañera sin pelo.

Necesitamos honestidad. Necesitamos que nos liberen de nuestra arrogancia especiecentrista. No existe evidencia alguna de que seamos «los elegidos», la especie exclusiva para la cual todas las demás fueron creadas. Tampoco somos los más importantes porque seamos tan numerosos, poderosos y peligrosos. Nuestra tenaz ilusión de poseer una patente de corso oculta nuestro verdadero estatus de mamíferos erectos y enclenques.

En la cultura popular la idea confusa de Gaia toca la fibra mitológica. Gaia hace resonar el deseo de importancia de nuestras cortas vidas ligadas a la Tierra. La Gaia mal interpretada sustenta el puritanismo de nuestros días: el discurso feminista sobre los peligros de la «violación» y la destrucción de la Tierra iluminada por el sol. Durante siglos hemos personificado a la naturaleza. La adhesión a la teoría Gaia de los que odian la ciencia y de los que extienden la alarma en los medios de comunicación es impresionante. Los primeros culpan a la ciencia, que sólo es una forma de saber, de los excesos de la tecnología y los segundos utilizan la ciencia para justificar su burdo arte de vender programas de televisión y revistas. Popularizada, exagerada o demonizada, la teoría Gaia no significa conservación de la naturaleza y el regreso a la Diosa. Gaia es la superficie regulada del planeta que crea incansablemente nuevos medios ambientales y nuevos organismos. Pero el planeta no es humano, tampoco pertenece a los humanos. Ninguna cultura humana, a pesar de su capacidad para la invención, podría destruir la vida en este planeta, incluso aunque lo intentara. Más que una enorme colección de ecosistemas que interactúan, la Tierra vista como la fisiología regulatoria gaiana trasciende a todos los organismos individuales. Los humanos no son el centro de la vida, tampoco lo es cualquier otra especie en concreto. Los humanos ni siquiera son fundamentales para la vida. Somos una parte reciente y que crece rápidamente de un todo antiguo y enorme.

Gaia no es ni maliciosa ni cuidadosa en relación con la humanidad; es un nombre conveniente para un fenómeno de escala terrestre: la regulación de la temperatura, la acidez/alcalinidad y la composición de gases. Gaia es

la serie de ecosistemas en interacción que componen un enorme ecosistema único en la superficie de la Tierra. Punto final.

Las pruebas fósiles registran que durante su historia de 3000 millones de años la vida terrestre ha soportado numerosos impactos iguales o mayores que la detonación total de las cinco mil bombas de nuestro arsenal nuclear. La vida, y especialmente la vida bacteriana, es resistente. Se ha alimentado de desastres y destrucción desde el comienzo. Gaia incorpora las crisis ecológicas de sus componentes, responde brillantemente y una nueva necesidad se convierte en la madre de la invención.

Al principio, las bacterias tomaron el hidrógeno (H_2) que necesitaban para sus cuerpos extrayéndolo directamente del aire. Después tomaron el sulfuro de hidrógeno (H_2S) eructado por los volcanes. Con el tiempo, las bacterias verde-azuladas arrancaron átomos de hidrógeno del agua (H_2O). El oxígeno fue expulsado como un producto metabólico residual. Este residuo, al principio catastrófico, impulsó con el tiempo el crecimiento continuado de la vida. Los nuevos desperdicios ponen a prueba la tolerancia de la vida y estimulan su creatividad. El oxígeno que necesitamos para respirar comenzó como una toxina; todavía lo es. La liberación de oxígeno por millones de cianobacterias dio como resultado un holocausto mucho más profundo que cualquier actividad medioambiental humana. La polución es natural. «No desperdices» es una exhortación, no una descripción. Los desperdicios de las cianobacterias se convirtieron en nuestro aire fresco. Los humanos obtenemos el hidrógeno que necesitamos comiendo plantas u otros animales. No podemos vivir sin él. Con frecuencia, los seres recién evolucionados crecen y se expanden rápidamente mediante la explotación de la energía, los suministros de alimento o los residuos ajenos. Pero la expansión de la población siempre cesa porque nadie puede comer o respirar sus propios residuos. Las poblaciones sufren un colapso o se frenan a medida que encuentran impedimentos para su expansión. Este control del crecimiento es exactamente lo que quería decir Darwin con «selección natural». Gaia es la suma de estas crecientes, interactivas y murientes poblaciones; Gaia, una cubierta multiespecífica planetaria compuesta por

miríadas de seres muy diferentes, es el único ecosistema gigante de la Tierra.

A diferencia de cualquiera de los ecosistemas que la componen, Gaia es el genio del reciclaje. Groso modo un quinto de la atmósfera de la Tierra es oxígeno (O_2). Combinado con el hidrógeno (H_2) o con gases que contienen hidrógeno (CH_4 , H_2S , NH_3), el oxígeno causa explosiones e incendios. Las reacciones que liberan energía transforman los gases reactivos en sus subproductos «gastados» o menos reactivos. Los gases reactivos como el hidrógeno (H_2), el metano (CH_4), el amoniaco (NH_3), el yoduro de metilo (CH_3I), el cloruro de metilo (CH_3Cl) y varios gases de azufre son detectables en la atmósfera de la Tierra porque son creados continuamente por la vida productora de residuos más rápido de lo que pueden reaccionar.

Mi antigua estudiante y vieja colega Lorraine Olendzenski y yo hicimos un vídeo en la Universidad de Massachusetts, Amherst (la antigua Facultad de Agricultura de Massachusetts). En el vídeo nuestra maravillosa amiga Betsy Blunt Harris —una microbióloga que ha estado enseñando a los profesores de los laboratorios de microbiología durante casi una década— introduce su mano cubierta por un guante a través de un orificio, una «fistula», practicado en el costado de una vaca sana. Los dedos de Betsy toman contacto con el rumen de la vaca, un estómago especial y enorme (uno de los cuatro que poseen todas las vacas y sus parientes rumiantes). Extrae de la fistula una pasta fibrosa de color marrón, principalmente hierba digerida sólo en parte. La pasta está tan plagada de microbios que debe ser altamente diluida antes de que podamos observarla a través de un microscopio. La comunidad microbiana de la vaca incluye extrañas células nadadoras, los protistas ciliados. En el rumen también viven muchas bacterias, la mayoría de ellas más pequeñas que los ciliados. Estos microbios realizan la tarea de la digestión del pasto^[43]. Sin ellos, ninguna vaca puede digerir la celulosa de la hierba. De hecho, en un sentido muy real, los microbios degradadores de celulosa son la vaca. Sin ellos no podría tragar, fermentar, regurgitar y volver a tragar. Ninguna vaca sería herbívora o rumiante sin estos intermediarios microbianos. Uno de los productos

gaseosos de la digestión de la hierba es el metano. Las vacas eructan enormes cantidades de este gas. El metano bovino es parte del motivo de que el aire de la Tierra sea una mezcla química altamente inestable. Las termitas comedoras de madera también liberan metano. Como las vacas, albergan en sus entrañas microbios que rompen la celulosa en varios compuestos químicos. El dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno y los gases que contienen azufre son expulsados al aire por el año de millones de termitas. Los sistemas gaseosos inestables a largo plazo de la atmósfera son el resultado de la incesante vida microbiana.

Generalizando estos hallazgos, Lovelock propuso que todo el sistema aéreo planetario es «metaestable», estable en su inestabilidad reactiva. La persistencia de la reactividad química es consecuencia de las acciones combinadas de los seres vivos. La superficie planetaria entera, no sólo los cuerpos vivientes sino la atmósfera a la que consideramos un trasfondo inerte, está tan lejos del equilibrio químico que es más correcto considerarla como algo vivo.

No puedo insistir con más fuerza en el hecho de que Gaia no es un único organismo. Mi Gaia no es una noción vaga y pintoresca de una Madre Tierra que nos nutre. La hipótesis Gaia es ciencia^[44]. La superficie del planeta, postula la teoría Gaia, se comporta como un sistema fisiológico en ciertos y limitados aspectos. Los aspectos que están controlados fisiológicamente incluyen la temperatura superficial, la composición atmosférica de gases reactivos —incluyendo el oxígeno— y el pH o índice de acidez/alcalinidad.

Sospecho que los científicos buscarán explicaciones gaianas para muchos fenómenos, como la alteración de los ciclos climáticos húmedos y secos y la distribución actual del oro, el hierro, los fosfatos y otros minerales. Gaia, que significa un cuerpo con una fisiología controlada en el sentido celestial-planetario y biológico, es el único nombre que puede unir a un grupo indisciplinado de científicos y hacer su trabajo accesible al público internacional. De la misma forma que el cuerpo humano está nítidamente definido por la piel, las diferencias de temperatura, la química de la sangre y un esqueleto de fosfato cálcico, se puede distinguir a la Tierra

de sus alrededores por su atmósfera persistentemente anómala, su temperatura estable y sus inusuales rocas calizas y graníticas. Lovelock compara la química de la atmósfera terrestre con un castillo de arena encontrado en una playa, o el nido de un pájaro. También ellos son productos obvios de la vida. La superficie del planeta no es sólo física, geológica y química, o ni siquiera sólo geoquímica. Es más bien geofisiológica: exhibe los atributos de un cuerpo vivo compuesto por el agregado de la vida incesantemente interactiva de la Tierra.

La química fisiológica, lo que llamamos metabolismo, es el resultado de la actividad de los seres vivos. El único punto que sigue siendo materia de discusión es el grado de vinculación que existe entre los sistemas químicos de Gaia. La teoría Gaia «débil» mantiene que el medio ambiente y la vida están emparejados; coevolucionan. Pocos están en desacuerdo. Muchos científicos rechazan esta idea porque no aporta nada nuevo. La Gaia «fuerte» afirma que el planeta, con la vida que hay en él, un único sistema viviente, está regulado en ciertos aspectos por esa vida. Ésta es la idea que suscita el escarnio de ciertos biólogos, especialmente el de aquellos que se autodenominan neodarwinistas. Liderados por Richard Dawkins, de Oxford, estos científicos rechazan la idea de un sistema planetario unificado que no ha evolucionado con otros sistemas planetarios por selección natural. Lovelock, que ha sido acusado de flaquear, afirma que nunca ha abandonado la «Gaia fuerte», término acuñado por J. Kirshner, un filósofo científico de la Universidad de California en Berkeley. En el encuentro de la Chapman Conference of the American Geophysical Union, Kirshner ridiculizó la «Gaia fuerte» después de haberla defendido insidiosamente. Se puede leer acerca de la contundente respuesta de Kirshner y los demás ante Gaia y su filosofía en el informe del encuentro editado por Schneider y Boston^[45]. Sin embargo Lovelock admite que ha renunciado a su noción original de que Gaia es «teleológica». Ya no afirma que el sistema planetario vivo se comporta coordinadamente para optimizar las condiciones de todos sus miembros. La biodiversidad es una exigencia absoluta para la persistencia de Gaia. No hay una lista de «las especies más favorecidas». Cualquier organismo va a lo suyo: crece y trata de

reproducirse. Las presiones selectivas, la insistencia de todos los organismos en crecer y reproducirse, favorecen determinados tipos de vida bajo determinadas condiciones específicas. Éstos crecen, se expanden, eliminan residuos y reciclan. A medida que lo hacen, ejercen enormes presiones de selección sobre tipos de vida diferentes. El resultado es Gaia. Si no hubiera vida, la temperatura y la composición de gases sería predecible basándose únicamente en factores físicos. El rendimiento energético del sol y las reglas de la química y la física determinarían las propiedades de la superficie de la Tierra. Pero estas propiedades se desvían significativamente de las predicciones basadas sólo en la física y la química. Las ciencias no biológicas no son suficientes para explicar el medio ambiente de la superficie terrestre. Cuando se toman en cuenta los polifacéticos papeles de los organismos vivos productores de gas y modificadores de la temperatura, las disparidades desaparecen. La teoría Gaia es ciencia útil.

Cualquier idea nueva genera crítica, especialmente en la ciencia, donde la crítica está institucionalizada por la atenta mirada de las publicaciones especializadas y los experimentos repetibles. La idea de Gaia requiere que los geólogos, los geoquímicos, los químicos atmosféricos e incluso los meteorólogos entiendan la ciencia que se extiende fuera de sus propios campos. Deben estudiar biología, especialmente microbiología. Pero el *apartheid* académico desarrolla resistencia. Aceptar Gaia conduciría a acciones que la gente de campos relacionados se resiste a ejecutar.

No hay nada nuevo en Gaia excepto el nombre, afirman algunos críticos. Otros aseguran que la proposición de que la superficie de la Tierra está viva es tan vaga que no se puede comprobar. No necesariamente: si definimos la vida como un sistema que se reproduce sujeto a selección natural, entonces Gaia está viva. La forma más fácil de verlo es mediante un experimento mental simple. Imaginemos que una nave espacial, que lleva microbios, hongos, animales y plantas, es enviada a Marte. Dejémosles producir su propio alimento, reciclar sus residuos y prosperar durante doscientos años. Gaia es el sistema de reciclaje global de la vida. Habría tenido lugar una gemación de Gaia para producir dos. La aparición de tal

Gaia en miniatura representaría reproducción de facto. El libro de Dorion Sagan *Biosphere* (*Biosfera*) expone claramente este argumento^[46].

Otra crítica a la teoría Gaia apela a los miedos de los científicos. El que la teoría Gaia recuerde a antiguas creencias en la Madre Tierra la convierte para algunos críticos en una idea peligrosamente acientífica. Ellos afirman que ninguna entidad planetaria puede actuar concertadamente si carece de control consciente. ¿Cómo sabe el planeta cuándo elevar o disminuir la concentración atmosférica de oxígeno para que se mantenga alrededor del 20 por ciento? Este nivel se mantiene oscilante entre la amenaza de incendio global y el riesgo de una muerte ampliamente extendida por asfixia. ¿Cómo puede Gaia «disponer» la eliminación de sal de los océanos para salvar a sus habitantes de un nivel amenazante de salinidad? ¿Cómo puede «ella» enfriar todo su cuerpo para compensar la creciente luminosidad del sol? ¿Cómo sabe Gaia regular la cubierta de nubes del océano en servicio a la temperatura? Es decir, ¿quién es Gaia?

Lovelock responde que Gaia no requiere conciencia para ajustarse al medio ambiente planetario. Trabajos recientes en matemáticas, llamados geometría de fractales, muestran que se pueden hacer elaborados gráficos que no son producto de un artista con una idea definida, sino de la repetición de unos sencillos pasos informáticos llamados algoritmos. De forma parecida, la vida produce fascinantes «diseños» repitiendo los ciclos químicos de su crecimiento y reproducción celular. El orden se genera mediante actividades repetitivas e inconscientes. Gaia, como la red entrelazada de toda vida, está viva, consciente y despierta en diferentes grados en todas sus células, cuerpos y sociedades. Análogos a la propiocepción, los patrones gaianos parecen haber sido planeados pero tienen lugar en ausencia de cualquier «cabeza» o «cerebro» central. La propiocepción, como la conciencia de uno mismo, evolucionó mucho antes de que los animales evolucionaran y mucho antes de que lo hicieran sus cerebros. La sensibilidad, la conciencia y las respuestas de las plantas, los protoctistas, los hongos, las bacterias y los animales —cada uno de ellos en su medio ambiente local— constituyen el patrón de repetición que subyace en último término a la sensibilidad global y a la respuesta de Gaia misma.

Lovelock desarrolló junto a Andy Watson, su colega y anterior estudiante de doctorado, un modelo informático llamado Daisyworld («El mundo de las margaritas»). Ellos parten de un planeta sobre el cual vivieran, por ejemplo, sólo margaritas blancas y negras. El planeta está expuesto a la radiación de una estrella, cuyo modelo es nuestro sol, que crece en luminosidad a lo largo de millones de años. Sin intervenciones externas, sin sexo ni evolución, sin presuposiciones místicas de conciencia planetaria, las margaritas de Daisyworld enfrián su mundo a pesar del sol que las calienta.

Las premisas son directas y sencillas. Las margaritas negras tienden a absorber calor y las blancas a reflejarlo. Ninguna de las dos flores crece por debajo de los 10 grados Celsius y todas mueren por encima de los 45. Dentro de este rango, las margaritas negras tienden a absorber el calor local y por tanto crecen más rápido en condiciones frías. Las margaritas blancas, puesto que reflejan y pierden más calor, tienen más éxito produciendo prole en condiciones calientes. Comencemos con el mundo de las margaritas negras. A medida que aumenta la luminosidad del sol, las margaritas negras crecen extendiendo su área superficial, absorbiendo calor y calentando su entorno. A medida que las margaritas negras calientan el terreno superficial que las rodea, la propia superficie se calienta, permitiendo un crecimiento aún mayor de la población. Esta retroalimentación positiva continúa hasta que el crecimiento de las margaritas ha calentado de tal manera los alrededores que las margaritas blancas empiezan a desplazar a las negras. Menos absorbentes y más reflectoras, las margaritas blancas empiezan a enfriar el planeta. El resultado acumulativo de estas acciones es calentar la superficie del planeta cuando está más frío —durante la evolución temprana del sol— y mantener después el planeta relativamente frío mientras aumenta la luminosidad solar. A pesar de la temperatura siempre en aumento del sol, el planeta se mantiene en una larga meseta de temperatura estable.

Daisyworld probó ser un punto de inflexión en la ciencia gaiana. Stephan Harding, catedrático del Schumacher College en Devon, Inglaterra, está creando ahora modelos parecidos con veintitrés especies de margaritas de distinto color, con herbívoros que se comen a las margaritas y carnívoros

que se comen a los herbívoros. En estos modelos no aparece relación alguna entre lo que es bueno para una especie en particular y lo que es bueno para el planeta como un todo. El crecimiento de la población de un tipo de organismo podría conducir a su propio colapso. Lo que sí ha aparecido es el perfil matemático de un solapamiento entre la selección natural y la regulación de la temperatura global. La regulación de la temperatura global es un ejemplo paradigmático de conducta gaiana. Los modelos de Harding indican que la supervivencia diferencial actúa reforzando o incluso generando consecuencias a nivel global. Los biólogos se muestran menos reacios a abrazar la teoría Gaia. La regulación de la temperatura es una función fisiológica no sólo en Daisyworld sino en los cuerpos y las sociedades de la vida. Los mamíferos, los atunes, las coles fétidas y los pañales regulan todos su temperatura para que fluctúe dentro de unos pocos grados. ¿Cómo «saben» las células vegetales o las abejas que habitan los pañales cómo mantener la temperatura? Cualquiera que sea la respuesta en principio, los atunes, las coles, las abejas y las células de los ratones exhiben el mismo tipo de regulación fisiológica que prevalece en todo el planeta.

Gaia, en toda su gloria simbiogenética, es inherentemente expansiva, sutil, estética, antigua y exquisitamente resistente. Ninguna colisión planetaria o explosión nuclear ha amenazado nunca a Gaia como un todo. Hasta ahora la única manera en la que los humanos estamos probando nuestra dominación es mediante la expansión. Seguimos siendo descarados, burdos y recientes, incluso aunque nos hagamos más numerosos. Nuestra dureza es una ilusión. ¿Tenemos la inteligencia y la disciplina necesarias para resistir a nuestra tendencia a crecer sin límite? El planeta no permitirá que nuestra población se siga expandiendo. Las poblaciones descontroladas de bacterias, langostas, cucarachas, ratones y hierbas siempre sufren un colapso. Sus propios desperdicios les repugnan a medida que prosigue el abarrotamiento y la escasez grave. Las enfermedades, que acechan tras las poblaciones en expansión oportunista de los «otros», vienen después, poniéndose a la cola del comportamiento destructivo y la desintegración social. Incluso los herbívoros, si están desesperados, se convierten en

depredadores malignos y caníbales. Las vacas cazarán ratones o se comerán a sus terneros y muchos mamíferos se disputarán la carne de sus compañeros de camada más pequeños. El sobrecrecimiento de la población conduce al estrés y el estrés hace disminuir el sobrecrecimiento de la población; un ejemplo de ciclo regulado gaiano.

Nosotros, las personas, somos iguales que nuestros compañeros de planeta. No podemos acabar con la naturaleza; sólo representamos una amenaza para nosotros mismos. La idea de que podemos destruir toda la vida, incluyendo a las bacterias que progresan en los tanques de agua de las centrales nucleares o en las fumarolas hirvientes, es ridícula. Escucho a nuestros hermanos no humanos riéndose por lo bajo: «salimos adelante sin vosotros antes de conoceros y ahora vamos a seguir adelante sin vosotros», cantan en armonía. La mayoría de ellos, los microbios, las ballenas, los insectos, las plantas con semilla y los pájaros todavía lo siguen haciendo. Los árboles de la selva tropical canturrean para sí mismos, esperando a que terminemos nuestra arrogante tala y puedan volver a su trabajo de crecer como solían hacerlo. Sus cacofonías y armonías continuarán mucho después de que nosotros nos hayamos ido.

APÉNDICE. CLASES PRINCIPALES DE VIDA*

PROKARIA (origen no simbiogenético)	Número de genomas	EUKARIA (origen simbiogenético)	Número mínimo de sistemas genéticos integrados (genomas o móndadas)
BACTERIAS «Mónera») arqueobacterias, eubacterias grampositivas eubacterias gramnegativas incluyendo a las cianobacterias	{ 1	PROTOCTISTAS algas marinas (todas las algas), amebas, ciliados, hongos mucosos, mohos plasmodiales, mastigóforos, mohos acuáticos HONGOS mohos, setas, levaduras, micorrizas de las raíces ANIMALES esponjas, medusas, cangrejos, bivalvos, caracoles, peces, pájaros y mamíferos PLANTAS musgos, helechos, coníferas y plantas con flor	} 2 } 3 } 4 } 5

* Véase Figura 2. [>>](#)



LYNN MARGULIS (Chicago, 5 de marzo de 1938 - Amherst, 22 de noviembre de 2011). Zoóloga estadounidense titulada en Zoología y Genética por la Universidad de Wisconsin y Doctora en Genética por la Universidad de California-Berkeley. Catedrática de biología de la Universidad de Massachusetts y codirectora del departamento de biología planetaria de la NASA.

A finales de los años 60, el físico británico James Lovelock, con el respaldo científico de Lynn Margulis, lanzó la polémica y célebre hipótesis de que la Tierra y todos sus seres vivos constituyen una entidad compleja autorregulada, al que llamaron Gaia. Margulis es autora de la teoría de la simbiogenésis, que explicaría el origen de las primeras células con núcleo a partir de la fusión de bacterias primitivas hace miles de millones de años.

En su teoría endosimbiótica, propone que las células eucariotas (células de animales, plantas, hongos y prototistas) se habrían originado a partir de diferentes células procariotas (sin núcleo) mediante una relación simbiótica que llegó a ser permanente. La expuso por primera vez en 1967. Las investigaciones de las últimas décadas han venido confirmando en casi todos sus puntos su teoría. Se descubrió, por ejemplo, que las estructuras

moleculares de los cloroplastos y las mitocondrias están más relacionadas con bacterias extrañas que con las células en las que están incorporados desde hace mil o dos mil millones de años.

Junto con el científico Robert Whittaker, propuso una clasificación de los seres vivos en cinco reinos a partir de la simbiogénesis (Monera, Protoctistas, Plantas, Animales y Hongos), en vez de los tres «vigentes» (Mineral, Vegetal y Animal).

Autora de casi 200 artículos de todo tipo. Miembro de la Academia nacional de las Ciencias de Estados Unidos desde 1983, de la Academia Rusa de Ciencias Naturales desde 1997 y de la Academia Americana de Artes y Ciencias desde 1998. En 1999 recibió la Medalla Nacional de Ciencia.

Estuvo casada desde 1957 a 1965 con el astrónomo Carl Sagan y es madre de Dorion Sagan, Jennifer Margulis, Jeremy Sagan y Zachary Margulis-Ohnuma.

NOTAS

[1] Se ha conservado el nombre «Gaia» (aunque su traducción al castellano sea «Gea») debido a su uso sistemático en textos científicos, sacrificando así su significado y etimología. (*N. de la T.*) [*<<*](#)

[2] Lynn Margulis y Dorion Sagan, *Slanted Truths: Essays on Gaia, Symbiosis and Evolution* (Nueva York: Copernicus Books, 1997): «Sunday with J. Robert Oppenheimer» y otras obras, muchas de ellas publicadas con anterioridad, describen el «gran problema» ocasionado por la biología neodarwinista y los efectos generalmente destructivos del *apartheid* académico. Los ensayos exponen detalladamente el contexto de la vida como un fenómeno planetario en el que la simbiogénesis, especialmente a través de asociaciones bacterianas, es la principal fuente de novedad evolutiva.

Lynn Margulis y Dorion Sagan, *What is Sex?* (Nueva York: Simón & Schuster, 1997): una investigación filosófica y gráfica de la evolución del sexo desde sus comienzos en un universo energético hasta el cibersexo y más allá. Edición española, *¿Qué es el sexo?*, Tusquets editores, 1999.

Lynn Margulis y Dorion Sagan, *What is Life?* (Nueva York: Simon & Schuster, 1996): ilustrada con fotografías y dibujos en blanco y negro, es una exploración filosófica y científica de una de las preguntas más fascinantes de la historia. Argumenta en favor de un concepto de la vida que trasciende tanto al mecanicismo como al vitalismo. Incluye secciones sobre la base solar de la economía global y el estatus de la humanidad como un superorganismo, y pone énfasis en el olvidado papel de la libre voluntad en el desarrollo evolutivo. Edición española, *¿Qué es la vida?*, Ediciones Proa, 1997.

Gaia to Microcosm, vol. 1, *Planetary Life* (Dubuque: Kendall/Hunt, 1994): cuatro vídeos cortos: *From Bacteria to Biosphere*; *Photosynthetic Bacteria —Red Sunlight Transformers*; *Spirosymplokos deltaeiberi —Microbial Mats and Mud Puddles*, y *Ophrydium versatile: What Is an Individual?*

Dorion Sagan y Lynn Margulis, *Carden of Microbial Delights: A Practical Guide to the Subvisible World* (Dubuque: Kendall/Hunt, 1993): una guía de la historia del conocimiento, la diversidad y la utilidad del mundo microscópico, con notas sobre cómo tener mascotas microbianas. Escrito con la mente puesta en profesores y estudiantes, amantes de la naturaleza y aficionados a los museos de historia natural, está abundantemente ilustrado.

Lynn Margulis, *Five Kingdoms Poster*, ilustrado por Christie Lyons, diseñado por Dorion Sagan (Rochester, Nueva York: Ward's, 1992): el conjunto incluye una guía para el profesor y una guía de actividades en clase. Edición española, *Cinco reinos*, Editorial Labor, 1985.

Lynn Margulis y Dorion Sagan, *Origins of Sex: Three Billion Years of Genetic Recombination* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 1991): la descripción y el momento de aparición de la recombinación de ADN en las bacterias, la fusión celular en los protistas, la aparición de los géneros, la alternancia de generaciones y otros procesos sexuales en el contexto de su evolución.

Lynn Margulis y Dorion Sagan, *Mystery Dance: On the Evolution of Human Sexuality* (Nueva York: Summit Books, 1991): resumen de los polifacéticos efectos de los ancestros en la forma y el comportamiento sexual humano. Entre las discusiones figuran el psicoanálisis lacaniano, los orígenes reptilianos del cerebro mamífero, la competición de los espermatozoides y el papel de los celos violentos en la propagación genética. El relato comienza con los ancestros más recientemente evolucionados y termina con los orígenes de la meiosis y el sexo bacteriano en unicélulas irradiadas con luz ultravioleta.

Lynn Margulis y Dorion Sagan, *Microcosmos: Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors*, prólogo del doctor Lewis Thomas (Berkeley: University of California Press, 1998): el popular informe sobre la vida temprana, incluyendo el origen de las células nucleadas, la

formación originalmente tóxica del oxígeno en la atmósfera de la Tierra y la aparición de las plantas y los animales a partir de colonias de microbios. Un nuevo prefacio de los autores recuerda la necesidad de ir más allá de la inversión estratégica de los microbios en humanos que aparece en el libro. El análisis comienza con el origen del universo, hace 15 000 millones de años, y termina con una especulación sobre el futuro de la vida, con y sin humanos. Edición española, *Microcosmos*, Tusquets editores, 1995. <<

[3] Lois Byrnes (Deep Time Associates, P. O. Box 58, Rockport, Massachusetts) creó la exposición «What is Life?» en el New England Science Center, 222 Harrington Way, Worcester, Massachusetts. Mostrando el arte de Christie Lyons, nuestros videos y otros medios para comunicar SET y Gaia, estas y otras excelentes exposiciones están abiertas al público de martes a sábado, de las 10 de la mañana a las 5 de la tarde. <<

[4] Nuestra relación con la naturaleza y con Dios, profunda y compleja, es maravillosamente analizada por Evan Eisenberg en su nueva obra, *Ecology of Eden* (Nueva York: Alfred Knopf, 1998). [<<](#)

[5] I. E. Wallin, *Symbioticism and the Origin of the Species* (Baltimore: Williams & Wilkins, 1927). Charles Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of the Favoured Races in the Struggle for Life* (Londres: Murray, 1859) (*El origen de las especies*).

<<

[6] Sorin Sonea y Maurice Panisset, *A New Bacteriology* (Sudbury, Mass.: Jones & Bartlett Publishers, 1993). <<

[7] Paul Nardon y A. M. Grenier, «Serial Endosymbiosis Theory and Weevil Evolution: The Role of Symbiosis», en L. Margulis y R. Fester, eds., *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1991). <<

[8] Estos organismos y su actividad han sido impresionantemente ilustrados en videos: véase Sciencewriters, *Gaia to Microorganism* (Dubuque, Iowa: Kendall/hunt Publishing Company, 1996), y Lorraine Olendzenski, Lynn Margulis y Steve Goodwin, *Looking at Microbes: The Microbiology Laboratory for Students* (Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers, 1998). <<

[9] Creado en 1894 por John Dewey, este colegio constituyó un experimento educativo tremadamente novedoso durante esta época. En él se investigaban nuevos métodos de enseñanza y se aplicaban teorías educativas cuyo centro principal era el alumno. Las asignaturas se enseñaban unas en relación con las otras y se estimulaba a los alumnos a seguir el método científico en sus aproximaciones a las distintas materias. Además, constituyó un centro de discusión para los académicos del momento sobre las ideas que preocupaban al país. (*N. de la T.*) <<

[¹⁰] G. G. Simpson, *An Autobiography* (Nueva York: Columbia University Press, 1977). <<

[11] Para una descripción técnica de la herencia, el origen y la evolución de estos orgánulos, véase la segunda edición de *Symbiosis in Cell Evolution* (Nueva York: W. H. Freeman, 1993). Para una visión menos técnica pero ciertamente adecuada del mismo tema, véase Lynn Margulis y Dorion Sagan, *Microcosmos: Four Billion Years of Evolution from Our Microbial Ancestors*. Para la atractiva y extraordinaria historia de la genética citoplásmica, véase J. Sapp, *Beyond the Gene* (Nueva York: Cambridge University Press, 1994). <<

[12] J. Sapp, *Evolution by Association: A History of Symbiosis* (Nueva York: Cambridge University Press, 1994). <[<](#)

[¹³] En el original *unclear*, «poco claros», que juega con *unnuclear*, literalmente «no nucleares». (*N. de la T.*) <<

[¹⁴] B. Ephrussi, *Nucleocytoplasmic Relations in Micro-Organisms* (Oxford, Reino Unido: Clarendon Press, 1953). <<

[15] Véase *Beyond the Gene* de Sapp, citado en la nota 3. [<<](#)

[16] J. Sapp, *Evolution by Association: A History of Symbiosis* (Nueva York: Oxford University Press, 1994). Dobzhansky: «Nada en biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución», cita de 1973, p. 187. <<

[17] R. Sanger y F. Ryan, *Cell Heredity* (Nueva York: John Wiley & Sons, 1961); véase también G. Pontecorvo, *Trends in Genetic Analysis* (Nueva York: Columbia University Press, 1959). [<<](#)

[18] E. B. Wilson, *The Cell in Development and Heredity*, 3.^a ed. (Nueva York: Macmillan Co., 1928). <<

[19] L. N. Khakhina, *Concepts of Symbiogenesis: A Historical and Critical Study of the Research of the Russian Botanists* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 1992). [<<](#)

[²⁰] D. C. Smith, «From the Extracellular to Intracellular: The Establishment of a Symbiosis», en *The Cell as a Habitat*, vol. 204 (Londres: The Royal Society, 1979), pp. 115-130. <<

[²¹] Un concepto del intrépido y prolífico explorador alemán del siglo XIX Christian Ehrenberg. Véase *What is Life?* en la nota 2 del prólogo. <<

[22] Los hongos mucosos no son en realidad hongos, sino protoctistas. Éste es un buen ejemplo de la confusión taxonómica que ha prevalecido desde las primeras clasificaciones modernas de los microorganismos y que ha perdurado en algunos nombres. (*N. de la T.*) <<

[23] H. F. Copeland, *Classification of the Lower Organisms* (Palo Alto, California: Palo Alto Books, 1956). <<

[24] R. H. Whittaker, *Community Ecology*, 2.^a ed. (Nueva York: Macmillan, 1975). <<

[25] R. H. Whittaker, «New Concepts of Kingdoms», *Science* 163, pp. 150-160, 1969. <<

[26] Los microbios incluyen las bacterias, los protoctistas más pequeños y los hongos más pequeños. Véase Lynn Margulis y Karlene V. Schwartz, *Five Kingdoms: An Illustrated Guide to the Phyla of Life on Earth*, 3.^a ed. (Nueva York: W. H. Freeman, 1998). Cada descripción de un *phylum* de bacterias, protoctistas, hongos, animales y plantas (aproximadamente cien *phyla*) está acompañada de la fotografía de un ejemplo de organismo, vivo si es posible, y de un dibujo de un miembro típico del *phylum*. <<

[27] Los protoctistas han sido representados en sus numerosos hábitats naturales, desde el desierto al océano abierto, en L. Margulis, K. V. Schwartz y M. Dolan, *Diversity of Life on Earth: Illustrated Five Kingdoms* (Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett, 1999). En todos los dibujos los microbios van acompañados de organismos familiares de mayor tamaño. <<

[28] *Ur* es un prefijo de origen alemán que significa «originario». (*N. de la T.*) <<

[²⁹] J. Morowitz, *Mayonnaise and the Origin of Life: Thoughts of Minds and Molecules* (Woodbridge, Conn.: Ox Bow Press, 1985). <<

[³⁰] D. Deamer y G. Fleischaker, *Origins of Life: The Central Concepts* (Sudbury, Mass.: Jones & Bartlett, 1994). <<

[³¹] Francis Crick, *Life Itself: Its Origins and Nature* (Nueva York: Simon & Schuster, 1981). <<

[³²] H. J. Morowitz, *Beginning of Cellular Life* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 1992). <<

[³³] F. Dyson, *Origin of Life* (Cambridge: Cambridge University Press, 1987). Edición española, *Los orígenes de la vida*, Cambridge University Press, 1999. <<

[³⁴] M. T. Madigan, J. M. Matinko y J. Parker, *Brock Biology of Microorganisms*, 8.^a ed. (Upper Saddle River, Nueva Jersey: Prentice Hall, 1997). Edición española, *Brock, Biología de los microorganismos*, Prentice Hall Iberia, 1997. <<

[35] Lynda J. Goff, «Symbiosis, Interspecific Gene Transfer and The Evolution of New Species: A Case Study in the Parasitic Red Algae», en L. Margulis y R. Fester, eds., *Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1991). <<

[36] Lynn Margulis y Dorion Sagan, *What is Sex?* (Nueva York: Simon & Schuster, 1997) y *Origins of Sex: Three Billion Years of Genetic Recombination* (New Haven, Conn.: Yale University Press, 1991). [<<](#)

[37] Hace referencia al proceso conocido como «devolución», es decir, la proliferación excesiva de una especie que a menudo precede a su extinción.
(N. de la T.) <<

[38] L. R. Cleveland, «The Origin and Evolution of Meiosis», *Science*, volumen 105, págs. 287-288, 1947. <[<<](#)

[³⁹] Literalmente «paseo o caminata espacial». (*N. de la T.*) [<<](#)

[40] M. A. McMenamin y D. S. McMenamin, *Hypersea: Life on Land*, (Nueva York: Columbia University Press, 1994). <<

[41] V. I. Vernadsky, *The Biosphere* (Nueva York: Copernicus, Sprin-ger-Verlag, 1998; 1926 en ruso). Edición española, *La biosfera*, Visor Distribuciones, 1997. [<<](#)

[42] James E. Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth* (Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 1979). <[<](#)

[43] Lorraine Olendzenski, Lynn Margulis y Steve Goodwin, vídeos *Looking at Microbes*: vol. 1, *The Microbiology Laboratory for Students*; vol. 2, *Microbe's World* (Sudbury, Mass.: Jones and Barlett Publishers, 1998). [<<](#)

[44] P. Bunyard, ed., *Gaia in Action: Science of the Living Earth* (Edimburgo, Reino Unido: Floris Books, 1996). <<

[45] S. Schneider y P. Boston, *Scientists on Gaia* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1990). [<<](#)

[46] Ibídem. <<

Notas de los epígrafes

[I] *Time does go on— / I tell it gay to those who suffer now— / They shall survive— / There is a sun— / They don't believe it now—*

[Todos los epígrafes de los capítulos son citas de Emily Dickinson (1830-1886); numeradas en T. H. Johnson, editores, *The Complete Book of Poems of Emily Dickinson* (Little Brown and Company, 1955).] <<

[III] *A Bee his burnished Carriage / Drove boldly to a Rose— / Combinedly
aligh-ting— / Himself—* <<

[III] *The hills erect their Purple Heads / The Rivers lean to see / Yet Man has
not of all the Throng / A Curiosity <<*

[IV] *Low at my problem bending / Another problem comes— / Larger than
mine —Serener— / Involving statelier sums <<*

[V] *Much Madness is divinest Sense— / To a discerning Eye— / Much Sense
—the starest Madness— / 'Tis the Majority / In this, as All, prevail— /
Assent—and you are sane— / Demur —you're straightway dangerous— /
And handled with a Chain— <<*

[VI] *What mystery pervades a well! / That water lives so far—... / Like looking every time you please / In an abyss's face!* <<

[VII] *When a Lover is a Beggar / Abject is his Knee— / When a Lover is an Owner / Different is he—* <<

[VIII] *Superfluous were the Sun / When Excellence be dead* <<

[IX] *There is no Silence in the Earth —so silent / As that endured / Which uttered, would discourage Nature / And Haunt the World.* <<