

Temas de actualidad

La simbiosis como mecanismo de evolución

Ricardo Guerrero

Departamento de Microbiología, Universidad de Barcelona, Avda. Diagonal 645, 08028 Barcelona.
E-mail: guerrero@retemail.es

Cierto que la ciencia, rebelándose, al parecer contra el destino, ha inventado el microscopio, con la mira de sorprender tan minúsculos enemigos (y esto representa ya un fruto intelectual del microbio). Mal haríais, sin embargo, en vanagloriaros de tan grosero instrumento. Juguete harto imperfecto todavía, a su incapacidad resolutiva escapan millones de vidas infinitesimales, ultramicroscópicas: las bacterias de las bacterias; el impalpable polvo de miríadas vitales disperso en el aire, el agua y las tierras; las imperceptibles colonias intracelulares, especie de federaciones simbióticas, que ahora solamente comienzan a alborear, a título de arriesgadísimas conjeturas, en la mente de algunos sabios audaces. Algún día os será lícito quizá rastrear la morfología y costumbres de tan diminutas y ultramicroscópicas organizaciones confinantes con la nada y muy distantes aún de las más groseras construcciones moleculares. Mas para ello os será fuerza abandonar los sencillos principios de la óptica amplificante fundados sobre el fenómeno banal de la refracción de las ondas luminosas visibles (oscilaciones bastas sobre las cuales sólo ejercen influencia partículaplástico superiores a unas décimas de micra), y recurrir a radiaciones invisibles, infinitamente delicadas y todavía ignotas, de la materia imponderable. Y así y todo, la ciencia no podrá agotar los dominios de la vida. Lo invisible, infinitamente más importante que lo visible, os envolverá siempre, y cada edad tendrá sus enemigos inaccesibles, porque el alazán del progreso sólo galopa espoleado por el calcañar de la muerte.

Quien esté familiarizado con la obra de los naturalistas rusos del último tercio del siglo XIX, al leer este párrafo podría pensar que tiene en sus manos la traducción (muy elegante, por cierto) de algún texto de autores como Konstantin Sergeevich Merezhkovsky (1855-1921), Andrei Sergeevich Famintsyn (1835-1918), o Boris Mijaylovich Kozo-Polyansky (1890-1957). Sin embargo, no es necesario ir tan lejos. El texto se debe a nuestro Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), y se encuentra en *El pesimista corregido*, uno de sus *Cuentos de vacaciones* [1]. Cajal escribió el libro en 1885, pero lo publicó 20 años más

tarde, y demuestra las aptitudes de Cajal para la ciencia ficción. El subtítulo de la obra es *Narracionesseudocientíficas*, e inicialmente tenía doce relatos, pero finalmente solamente publicó cinco: *A secreto agravio, secreta venganza, El fabricante de honradez, La casa maldita, El pesimista corregido, y El hombre natural y el hombre artificial*. Algunos de estos cuentos reflejan la fascinación de Cajal por los microorganismos y por la manera que tiene el cuerpo de luchar contra la invasión microbiana. De *Cuentos de vacaciones* se han hecho varias ediciones (por ejemplo, en la Colección Austral de Espasa Calpe) y recientemente se ha traducido al inglés (por Laura Otis, University of Illinois Press, 2001 [2]).

Siendo estudiante de medicina, Cajal escribió una novela "biológica" –así la definió él– que mostraba el cuerpo humano desde la perspectiva microbiana y como un campo de batalla entre los leucocitos y las células invasoras. Desgraciadamente, estas primeras obras, inéditas, se han perdido.

La idea de la existencia de la simbiosis, y de su papel en la evolución, no es nueva en biología. No obstante, hasta hace muy poco correspondía más bien al sector que podríamos calificar de heterodoxo, y a autores que no eran especialmente bien vistos por el núcleo central, "autorizado" y "autorizador", del pensamiento biológico moderno.

La madre naturaleza nunca se ha acomodado, y probablemente nunca vaya a hacerlo, a los deseos de dominio con que nuestra especie ha intentado doblegarla. La naturaleza es demasiado "salvaje", o demasiado "anárquica", dependiendo del trasfondo ideológico con el que se la contemple. Pero hay un dicho castellano que indica que, bien al contrario, "es muy sabia". Los gemelos idénticos, con una dotación genética semejante, nunca son absolutamente idénticos en sus manifestaciones. Por ejemplo, sus conexiones neuronales difieren tanto entre ellos como puedan diferir las de dos personas sin ningún vínculo genético. La identidad absoluta es una fantasía platónica, como lo es el absoluto control biológico. El mundo real está marcado por diferencias, ambigüedades,

impurezas, mezclas y experiencias. Los genes pueden fluir entre microorganismos en un parpadeo del tiempo geológico. La segunda ley de la termodinámica muestra una tendencia probabilística a mezclar diferencias, a romper gradientes. La naturaleza odia el vacío. Todo microbiólogo sabe del esfuerzo que cuesta mantener axénicamente una cepa bacteriana durante un período de tiempo prolongado. El mundo tangible no favorece la pureza genética. La naturaleza, impredecible y alevosa para algunos, juega ora dispersando, ora reuniendo, conjuntos variopintos de múltiples elementos.

Genes, DNA, de indiscutible origen procariótico se hallan en plantas, animales y hongos. Nuestra identidad genética se ramifica continuamente por efecto de genes bacterianos o víricos extraños, o incluso por bacterias y virus que no son patógenos invasores, sino que se integran constante y necesariamente en lo que creemos es nuestro yo más puro.

Cuando se habla de modificación genética –"manipulación" para sus detractores–, de biotecnología, se proyecta un halo de oscuridad y surge el temor ante lo que cerebros malvados serán capaces de perpetrar. Y sin embargo, la ingeniería genética en sí, los procesos biotecnológicos, tienen tantos eones como la propia vida celular, previa en casi cuatro mil millones de años a la aparición de la especie humana sobre la Tierra. Sexo, simbiosis y formación de comunidades vivas de muy diferentes tipos son formas de biotecnología y de "manipulación" genética endógena que han permitido, y determinado, la evolución de la humanidad.

Las ideas científicas influyen sobre la vida cotidiana y ayudan a la formación de perspectivas nuevas y de enfoques críticos sobre el futuro del pensamiento humano. La aproximación popular a la ciencia debe desligarse de cualquier tendencia dogmática, religiosa o mágica, en la explicación de los fenómenos y en el planteamiento de sus hipótesis. Sucede, sin embargo, que puesto que muchas de las preguntas que se hace la ciencia están en la base de las inquietudes humanas –"nuestro origen, por ejemplo–, las distintas religiones y recientemente la pseudociencia han ideado respuestas para dichas preguntas. Para tranquilidad de los buenos espíritus, la ciencia no está interesada en contradecir la explicación que cada una de las religiones ofrece a esos interrogantes. Sólo, que la ciencia, esencialmente pragmática, limita la búsqueda de sus respuestas y la de sus objetos de estudio a elementos y cuestiones físicamente verificables. En todas cuantas respuestas ha dado la ciencia su objetivo no ha sido nunca

vencer a los creyentes religiosos, sino convencer a los dogmáticos, cualesquiera que sean sus atenuados.

Cuando se consideran en su conjunto las grandes incógnitas, hay que tener en cuenta la utilización y la distinción que a menudo se hace de los elementos del mundo vivo. La abstracción corriente de la unidad de la vida y su medio sobre la superficie de la Tierra tiene consecuencias que los humanos apenas hemos empezado a entender. La vida es una fuerza geológica y hace que las condiciones para su mantenimiento –adecuación de la temperatura, de la composición química del suelo y de las proporciones de gases presentes en la atmósfera– sean aportadas por la propia vida. Eugene Odum apoyó la idea de la biosfera como un sistema homeostático o cibernético formado por componentes vivos e inertes; incluso comprendió el papel fundamental que en dicho sistema desempeñaban los microorganismos. Cuando se habla de la fisiología de los mamíferos y de los mecanismos por los cuales se mantiene la temperatura corporal, o las concentraciones de calcio, sodio o potasio en sus estrechos límites, se está hablando de materia científica, no filosófica, ni teológica, ni teleológica. De igual forma, cuando nos referimos a la geofisiología, a los mecanismos que han mantenido la composición de la atmósfera lejos de un equilibrio estable a través de millones de años, nos estamos refiriendo a flujos de energía y materia que los científicos pueden investigar. Sin embargo, y como indica Ramon Margalef en su Introducción a la edición española de *La Biosfera* (3), *la ampliación de cualquier visión global a otros dominios de la ciencia o de la filosofía, en el sentido de superponer, al considerar la evolución del mundo físico, una nueva esfera en la que podrían tener cabida la mente, la inteligencia o el espíritu, era casi de prever.*

Simbiosis es la conexión física entre organismos de diferentes especies, una asociación que en ocasiones resulta extraña. Miembros de especies con una relación muy lejana pueden unirse mediante sus raíces, por medio de agujeros en su esqueleto, en la piel, por conexiones humorales o de muchas otras formas. En sentido estricto, los miembros simbiotes individuales de al menos dos especies tienen que estar en contacto la mayor parte del tiempo. Si relajamos este criterio y permitimos que ese contacto se retraiga, vemos inmediatamente que todos los seres vivos sobre la Tierra están en contacto a través del agua, la atmósfera y el suelo, y todos parecen haber hallado cobijo en la superficie de un planeta limitado.

Un descubrimiento moderno de la biología es que algunas simbiosis son contingentes. Los

socios, como los huéspedes (ambos sentidos), llegan y se van al albur de las condiciones. Otras simbiosis, una vez cubierta una etapa flexible, se convierten en asociaciones estables. A medida que los primeros huéspedes se quedan, las codependencias llevan a nuevas estructuras. Toda vida posee algún tipo de conexión con cualquier otra forma de vida. Comunidades tan complejas como las que hemos observado en el intestino de los termes, por ejemplo, han permanecido inalteradas durante millones de años (4), precisamente porque esa comunidad permite un tipo especial de vida a un conjunto de organismos de los cuales solamente nos fijamos en el más externo y mayor: el insecto.

Con pocas excepciones, las bacterias generalmente no mueren, si bien se las puede matar. Si disponen de agua en estado líquido, y de donadores y aceptores de electrones adecuados, prosiguen su crecimiento celular por división indefinida. La muerte "programada", como hecho predecible en la historia de la vida, aparece por primera vez en bacterias físicas y morfológicamente muy complejas: las cianobacterias. Dichos organismos poseen unas células diferenciadas –los heterocistes–, que llevan a cabo la fijación de nitrógeno y que son "mortales", ya que no pueden reproducirse y su muerte está programada genéticamente. Pero la muerte programada está mucho más desarrollada en los organismos que evolucionaron como comunidades bacterianas, los eucariotas. A diferencia de algunas células bacterianas (como los mencionados heterocistes de las cianobacterias), la célula de levadura –un eucariota– no se reproduce indefinidamente. Por ejemplo, observada con el microscopio electrónico de barrido, una célula de levadura en crecimiento muestra una cicatriz circular en cada lugar donde se ha formado una yema. A medida que van apareciendo más y más yemas, que se desprenden formando nuevas células, se aprecian más cicatrices en diferentes lugares de la superficie celular. Cuando hay muchas cicatrices, la célula de levadura deja de reproducirse y muere. Los animales y las plantas que se reproducen sexualmente han llevado la muerte celular aún más lejos. Debemos distinguir dos clases de células, las del cuerpo, o soma, que mueren, y las células reproductoras, o germen, que retienen su capacidad de producir nuevos organismos mediante división celular. Lo que solemos llamar la individualidad de estos organismos es en realidad una simbiosis compleja de muchos organismos que anteriormente tuvieron una vida independiente, lo cual implica ajuste e integración constantes. Una de las invenciones de la vida, la reproducción a través de la fusión sexual y la

repetición imperfecta de las formas, es un elemento clave en la evolución.

Evolución es historia; consiste en experimentar cambios a través del tiempo. Muchas veces se dice que las estrellas y galaxias, el sistema solar y los planetas, las distintas formas de vida y las sociedades, "evolucionan". La forma que toma esa "evolución" es actualmente objeto de estudio y atrae cada vez mayor atención. La superficie de nuestro planeta ha cambiado como respuesta a la vida que se desarrollaba sobre ella, de la misma manera que la propia vida ha cambiado en respuesta a la evolución de la Tierra. La biosfera es muy antigua. La Tierra viva tiene casi cuatro mil millones de años, sólo seiscientos millones de años menos que el propio planeta. La continuidad y unidad de la vida que conocemos se muestra claramente en la uniformidad de los sistemas genéticos y de la composición molecular de los organismos que la integran. La biología molecular muestra de forma convincente que toda la vida actual sobre la Tierra comparte un antecesor común. Hay pues un lazo íntimo entre evolución y organismos. La evolución conecta toda la vida a través del tiempo. Toda la vida sobre la Tierra está conectada a través del espacio-tiempo quadridimensional.

Muchos años antes de que los biólogos modernos contaran con los instrumentos para averiguar si las células debían su complejidad a microorganismos simbióticos, un naturalista ruso, el antes citado Merezhkovsky, intuyó que los cloroplastos de las plantas, esas lentejuelas verdes de las células fotosintéticas, son unos invasores "recientes", unos pasajeros que han modificado las prestaciones del vehículo al cual se han subido. Merezhkovsky se dio cuenta de que esos orgánulos celulares se parecían mucho más a las cianobacterias (en aquella época se llamaban "algas azules", aunque no son ni lo uno ni lo otro), que a cualquier otra estructura de la célula. Averiguó también que los cloroplastos se reproducen por sí mismos, independientemente del ciclo de división celular. Observó que, simplemente, se separaban por fisión, como las bacterias, pero lo hacían en los confines de la célula. Merezhkovsky y Famintsyn, que había intentado que los cloroplastos se reprodujeran en cultivo axénico, propusieron que dichos orgánulos son en realidad cianobacterias que se instalaron en un primer antecesor de las células de plantas y posteriormente perdieron su autonomía.

La célula eucariótica, provista de núcleo, es la unidad anatómica elemental que compone el cuerpo de animales, plantas y hongos; proviene de las primeras bacterias, a partir de las cuales evolucionó mediante una serie de simbiosis. El origen

de la célula eucariota es un caso especial del fenómeno general de evolución de asociaciones microbianas. La aparición de especies asociadas y su coevolución empezó como mínimo hace 3.500 millones de años y ha llegado hasta la actualidad. Las interacciones microbianas desempeñaron también un importante papel en la evolución de las células, a la vez que tuvieron efectos profundos sobre los sedimentos de la superficie de la Tierra y la atmósfera.

Hace ya más de 30 años que pisamos la Luna y tuvimos ocasión de contemplarnos desde el espacio. Desde ese mismo espacio hemos podido percibir una Tierra que es modificada por esa vida que cobija, en tanto ella misma, la Tierra, transforma a la propia vida. La evolución de la célula no es algo desconocido ni misterioso. Puede descifrarse y seguirse a través de las múltiples huellas que ha ido dejando y que nosotros, ayudados por nuestra inteligencia y tecnología, podemos interpretar. Esa interpretación puede ser conservadora, ajustándose a los límites de las teorías y explicaciones que otros han propuesto, o arriesgada, revolucionaria, yendo más allá de esos límites, aunque siempre basándose en datos que permiten la extralimitación. En ciencia no hay saltos en el vacío que puedan permanecer irresolutos por mucho tiempo; como tampoco hay errores duraderos.

La historia de la célula está fuertemente ligada a la de la Tierra y esto es algo que podemos comprender siguiendo el origen y la evolución de la vida a partir de su componente esencial, la célula procariótica. La evolución comprende, además de cambios genéticos en las poblaciones de organismos, cambios en los ambientes terrestres. La universalidad de la bioquímica de la reproducción es consecuencia del origen común de toda la vida en la Tierra. Todos los seres vivos que conocemos proceden de células que contenían sistemas de transmisión de información basados en la replicación del DNA y en la síntesis de proteínas dirigida por RNA mensajero.

La teoría simbiótica del origen y evolución celular se apoya en dos conceptos biológicos. El primero y fundamental es la división del mundo vivo entre organismos procaróticos y eucarióticos, entre bacterias y los otros organismos compuestos de células con núcleo, es decir, protoctistas, animales, hongos y plantas. El segundo concepto es que algunas partes de la célula eucariótica se formaron directamente a partir de asociaciones permanentes de organismos de diferentes especies. Tres clases de orgánulos (cilios, mitocondrias y plastidios fotosintéticos) fueron una vez bacterias de vida libre que, por mecanismos simbióticos,

pasaron a formar parte de otras bacterias diferentes. Una aproximación distinta, tradicional, establece una filiación directa y mantiene que las orgánulos celulares (centriolos, mitocondrias y plastidios) evolucionaron a partir de una compartimentación en el interior de las células. La teoría simbiótica entronca en gran manera con un pensamiento evolutivo como el que desarrollaron genéticos, ecólogos y citólogos, incluyendo científicos que fundieron la genética mendeliana con la selección natural de Darwin. También se apoya en campos nuevos o revitalizados como la biología molecular, especialmente el estudio de los ácidos nucleicos y la secuencia y estructura de las proteínas, la micropaleontología, que estudia las pruebas más tempranas de la vida, e incluso la química y la física atmosféricas en tanto en cuanto están relacionadas con la generación biológica de gases.

Tres circunstancias son necesarias para que tenga lugar la evolución: Reproducción, variaciones transmisibles o mutaciones y presión ambiental selectiva. Asegurada la primera, las otras dos se producen de forma irremediable. Entre las numerosas presiones ambientales, cabe mencionar variaciones en la temperatura, en la cantidad y cualidad de la luz solar, en las concentraciones de sales en el agua, etc. Es lógico pensar que, muy pronto en la evolución temprana de la célula, la fermentación de pequeñas moléculas y metabolitos universales proporcionaron energía y carbono para la síntesis de ácidos nucleicos. Cualquier organismo capaz de convertir un compuesto que estuviese disponible en otro necesario para la reproducción celular podría sobrevivir en ausencia del compuesto que anteriormente había sido necesario. La evolución del metabolismo bacteriano puede seguirse mediante el estudio de la distribución actual de las vías metabólicas de los procariotas, de las ventajas selectivas de sus productos finales y de la conservación bioquímica.

El aumento en la concentración de oxígeno en la atmósfera provocó una crisis. Anteriormente, se habían extendido las poblaciones de bacterias anaeróbicas. Ahora, la supervivencia exigía microbios capaces de tolerar el oxígeno. La respuesta de los procariotas fue extraordinariamente diversa, sobre todo cuando se compara con la aerobiosis uniforme de los eucariotas (aunque siguen conservando la capacidad anaeróbica). Grupos de microbios que presentaban una gran divergencia, como actinobacterias, bacilos, espiroquetas y cianobacterias, desarrollaron vías metabólicas diferentes, pero análogas, para enfrentarse al aumento de oxígeno. Algunos miembros de cada uno de los grupos principales de procariotas anaerobios

se volvieron tolerante para el oxígeno e incluso lo utilizó. Por lo menos unos de ellos se convirtieron en diversos tipos de mitocondrias. Cuando el oxígeno acumulado en la atmósfera alcanzó la concentración que mantiene en la actualidad, ya había muchas clases de bacterias que habitaban mares y lagos, cubrían los suelos y liberaban esporas en el aire. Estromatolitos y microfósiles, abundantes y diseminados en el tiempo y en el espacio, son testigos incontrovertibles de la edad de oro de los procariotas, mucho antes de la explosión morfológica de la vida eucariótica. La acumulación de oxígeno atmosférico puso fin a la producción abiótica de compuestos orgánicos, ya que éstos son destruidos rápidamente por el oxígeno libre. Las bacterias pasaron a establecer una estrecha interdependencia para el suministro de gases, ventilación y eliminación de los productos de desecho. Emergieron muchas clases de relaciones, incluidas la simbiosis, el parasitismo, y la depredación. Una clase de simbiosis llevó a la formación de nuevos tipos de células.

Todas las grandes innovaciones en la evolución de las células tuvieron lugar antes de la aparición de cualquier animal, planta u hongo. La principal ruta bioquímica ya había sido establecida y se habían desarrollado los patrones de mitosis, meiosis y fecundación en algunos protistas, aunque no en todos. Hace unos 700 millones de años, ciertos eucariotas heterótrofos que habían ingerido procariotas fotosintéticos devinieron en algas. Hace 400 millones de años ya puede hablarse de un asentamiento bien establecido de plantas, animales y hongos.

La Tierra, Venus y Marte son como tres sistemas hermanos, tres planetas con orígenes parecidos que ocupan lugares próximos en el sistema solar, en una zona que consideramos "habitable". Parece arriesgado afirmar esto cuando las condiciones de la Tierra, donde tenemos la certeza de que existe vida, son tan diferentes de las que se dan en los otros dos planetas. Sin embargo, estas grandes diferencias no existían al principio. Ocurrió que uno de los tres se vio sometido a una serie de fenómenos que fueron cambiando sus condiciones hasta hacerlo totalmente distinto a los otros. Éstos, Marte y Venus, siguieron una trayectoria que podríamos llamar normal, dentro de los cánones planetarios. En el otro, la Tierra, apareció un fenómeno que llamamos vida, que fue modificando su aspecto, su estructura y otras características fundamentales hasta hacerlo radicalmente diferente a sus hermanos del espacio.

El estudio de la biología moderna tiene una deuda contraída con los procariotas y ésta es la idea de que las características de la Tierra están

perfectamente diseñadas para mantener la vida tal como la conocemos. Disponemos del oxígeno que respiramos gracias a que apareció una forma de vida, se reprodujo, experimentó cambios y evolucionó. Los primeros procariotas no necesitaban una atmósfera oxigenada pero cuando el oxígeno apareció, debido a la actividad metabólica procariótica, se adaptaron al cambio y transmitieron esa característica a sus descendientes. La Tierra pudo así albergar sucesivas formas de vida, incluso la humana. Otra característica de nuestro planeta, producto asimismo de los procariotas, supone una siguiente aportación al estudio de la biología y es que todos los procesos que originaron la vida –biopoyéticos–, no son suficientes por sí mismos para asegurar la continuación y permanencia de la vida en nuestro planeta. Eso explicaría la ausencia de vida en Marte; no que nunca haya habido vida allí, sino que tal vez no prosperó. Puede que se haya originado vida muchas veces, pero la falta de otros fenómenos, la formación de un ecosistema –ecopoyesis–, no permitió que la vida siguiera adelante. La aparición de ecosistemas significa la existencia de células diferentes que aprovechan los subproductos de otras células, y la irrupción de un tercer tipo que aprovecha lo que han dejado las segundas; al final, las primeras células de esta serie utilizan lo que han producido las últimas, estableciéndose un ciclo de materia que usa la energía del sol para las transformaciones químicas. Esta aparición de ecosistemas fue esencial porque en tanto que la energía solar es aparentemente ilimitada, no sucede lo mismo con la materia que hay sobre la Tierra. Ese comportamiento de los microorganismos, aprovechamiento máximo de la energía y reciclado máximo aseguró la continuidad y permanencia de la vida sobre la Tierra. Nuestra especie, los humanos, también somos consecuencia de ello.

Referencias

1. Ramón y Cajal S. (1941) Cuentos de vacaciones. Narraciones seudocientíficas. Madrid: Espasa Calpe.
2. Otis L (2001) Ramón y Cajal, a pioneer in science fiction. *Int Microbiol* 4:175-178
3. Margalef, R. Introducción. En Vernadsky VI (ed.) *La Biosfera*. Fundación Argentina. Madrid, 1997
4. Wier A, Dolan M, Grimaldi D, Guerrero R, Wagensberg J, Margulis L. (2002) *Spirochete* and protist symbionts of a termite (*Mastotermes electrodominus*) in Miocen amber. *Proc Natl Acad Sci USA* 99:1410-1413.

