



JESÚS MOSTERÍN

Consejo Superior de Investigaciones Científicas
España

66611

RESUMEN

Aunque la vida sea un milagro no parece desempeñar ninguna función crucial en la vida del Universo, pues, a gran escala, el protagonismo pertenece a la materia oscura, a los cúmulos de galaxias, a las inmensas nubes de gas y polvo, a los agujeros negros, a las explosiones cataclísmicas, donde la vida parecería no tener lugar. Sin embargo, y pese a su insignificancia a nivel cósmico, ocupa el lugar central en nuestra conciencia, en nuestros afectos y preocupaciones, en nuestros valores y emociones

Después de centrar la atención en el significado biológico y no en el biográfico de vida, y después de exponer la propuesta de diferentes definiciones de la vida y sus insuficiencias, en el presente trabajo se hace notar que la vida, al menos como la conocemos en la tierra, es un acontecimiento singular, dado que responde sobre todo a las leyes de la biología con exclusivo alcance terrestre más que a las leyes de la química y la física, cuyo alcance es universal. Pero también se exploran otras posibilidades de vida desde sus características físico químicas ¿Es, entonces, la vida una rara excepción en un universo abiótico o una ocurrencia frecuente en un universo hormigueante de vida? ¿son concebibles otras formas de vida? Hay quienes afirman que la vida es casi un milagro (Ernst Mayr), hay otros que afirman lo contrario, que responde a leyes universales, que es un "imperativo cósmico"



Discusiones Filosóficas
Departamento de Filosofía
Universidad de Caldas

Nº 5 - 6 Enero - Diciembre de 2002

(Christian de Duve). *Lo cierto es que para averiguar si somos milagros únicos o ciclos regulares del devenir cósmico, necesitaríamos averiguar si hay vida extraterrestre y cuáles son sus características, sólo así se podría responder con alguna precisión a la pregunta ¿qué es la vida?*

Palabras clave: Definiciones de vida (metabólica – termodinámica – reproductiva – complejidad – evolutiva) – fuerza electromagnética – carbono – polímeros – aminoácidos – proteínas.

ABSTRACT

¿What is life?

Although life may be a miracle, it does not appear to have any crucial function in the life of the universe, since, from its perspective dark matter, groups of galaxies, huge gas and dust clouds, dark holes and cataclysmic explosions (where it seems there is no life) have the leading role. However, despite its lack of significance in the cosmic level, life has a central role in our consciousness, in our affections and worries, in our values and emotions.

Alter focusing in the biological (rather than biographical) meaning of life, and after expounding and examining the limitations of different definitions of life, this work maintains that life, at least as it is known on earth, is unique since it obeys mainly biological laws restricted to our planet, rather than physical or chemical laws which are universal. Other possibilities of life, from their physico-chemical characteristics are explored. Is life a rare exception in a non-biotic

universe or is it a common occurrence in a universe full of life? Can we conceive of other forms of life? There are some who hold that life is almost a miracle (Ernst Mayr), some others think that it obeys universal laws, that it is a "cosmic imperative" (Christian de Duve). Whatever it may be, in order to find out whether we are unique miracles or regular cycles of a cosmic coming to be, we need to determine whether there is extraterrestrial life and which are its characteristics. Only through this we can have a precise answer to the question: What is life?

Key Words: Definitions of life (metabolic – reproductive – thermodynamics – evolute complexity) – electromagnetic force – carbon – polymers – aminoacids – proteins.

Si un milagro es algo sumamente improbable, pero real y maravilloso,¹ entonces la vida es el milagro por antonomasia. Desde un punto de vista físico, sería de esperar que algo tan inverosímil y alejado del equilibrio como la vida no existiera. Sin embargo, aquí estamos nosotros, milagros vivientes, atestiguando que existe. La vida es rara; en nuestro sistema solar solo parece existir en la superficie de la Tierra, donde se extinguirá por evaporación del agua en unos 2000 millones de años, antes de que, en otros 2000 millones más, la Tierra sea engullida por el Sol, convertido en gigante roja.

¹ La idea de *milagro*, como la de *progreso*, involucra una valoración positiva por parte del hablante.

En general, la vida parece estar limitada a nuestra época cósmica (10^{10} años tras el Big Bang, un orden de magnitud más o menos).²

La vida no parece desempeñar ninguna función crucial en la economía del universo. A gran escala, el protagonismo pertenece a la materia oscura, a los cúmulos de galaxias, a las inmensas nubes de gas y polvo, a los agujeros negros y las explosiones cataclísmicas, donde la vida parecería no tener lugar. En cualquier caso, y a escala cósmica, el universo está regido por la fuerza gravitatoria (la curvatura del espaciotiempo), que depende sólo de la distribución y densidad de la energía. Y la masa (o energía) de los seres vivos es totalmente insignificante. Sin embargo, aunque insignificante a nivel cósmico, la vida ocupa el lugar central en nuestra conciencia, en nuestros afectos y preocupaciones, en nuestros valores y emociones. Dependemos completamente de otros organismos vivos para obtener el aire que respiramos y los alimentos que comemos. Nosotros mismos somos seres vivos, como también lo son nuestros parientes y amigos, los perros que nos acompañan y los microbios que nos infectan o nos ayudan a digerir.

¿Qué es la vida? ¿En qué se diferencian los seres vivos de los no vivos? Sorprendentemente, entre los grandes filósofos clásicos, Aristóteles es el único que se ha planteado directamente la cuestión, hace 2.400 años.

La noción aristotélica de vida

Aristóteles enfoca el estudio de la vida desde la perspectiva del movimiento y de la función. Desde el punto de vista del movimiento, distingue entre las cosas inertes, que sólo se mueven por el impulso de otras, y las semovientes o automotoras, que tienen en sí mismas el principio u origen de su propio movimiento o cambio (*kínesis*). La palabra *kínesis* significa no sólo el movimiento propiamente dicho o locomoción, sino cualquier tipo de cambio, como, por ejemplo, el crecimiento y la maduración. Aunque generalmente las plantas no se mueven de sitio, germinan, crecen, se ramifican, florecen, sueltan su polen, son fecundadas, fructifican, pierden las hojas y, en definitiva, cambian. Los seres vivos son semovientes, pero también lo son (según Aristóteles) los elementos químicos B tierra, agua, aire y fuego B, que tienen una tendencia natural a moverse hacia su lugar natural. Por eso las piedras, al soltarlas, se mueven por

² Unos 10^{12} años tras el Big Bang se apagarán las últimas estrellas, con lo que ya no habrá radiación capaz de sostener la vida. Las galaxias desaparecerán 10^{22} años tras el Big Bang; los agujeros negros galácticos acabarán de evaporarse por radiación de Hawking unos 10^{60} años tras el Big Bang.

sí mismas hacia abajo (no se conocía la gravitación), hacia el centro de la Tierra, que es su lugar natural, mientras el fuego sube hacia arriba, hacia el cielo. Lo que les falta a los elementos químicos para estar vivos son los órganos, es decir, las estructuras internas provistas de función (*érgon*). Los seres vivos tienen órganos, pero también los tienen los artefactos, aunque no por naturaleza, sino por diseño del artesano que los ha producido. De todos modos, los artefactos no se mueven por sí mismos. (En la Grecia clásica no había automóviles; los carros inertes eran movidos por caballos semovientes). Los seres vivos, y sólo ellos, satisfacen la doble condición de ser semovientes y funcionales, de tener dentro de sí la fuente de su movimiento y de estar provistos de órganos con tareas intrínsecas.

En el *Perí psychés* (el tratado aristotélico de biología teórica) el alma (*psykhé*) y la vida (*zoé*) se relacionan y contraponen como la primera y la segunda actualización de las potencialidades del cuerpo. El alma es la organización del cuerpo vivo (su primera actualización o plenitud), que es lo que lo diferencia de un mero cadáver. Un cuerpo bien organizado (un cuerpo con alma) tiene la potencialidad de llevar a cabo las funciones vitales. La actualización de esta potencialidad (la actividad biológica) es la vida. Todos los organismos vivos tienen vida

vegetativa, es decir, todos desempeñan al menos las funciones básicas del metabolismo y la reproducción. Los animales, además de alimentarse y reproducirse, ejercen también funciones cognitivas y emotivas y son capaces de automoción.

Los seres vivos como individuos

Aristóteles usó el término *ousía* (sustancia o entidad) de diversos modos, pero sobre todo para referirse a las cosas concretas, tales como un humano particular (Sócrates, por ejemplo) o un caballo determinado. Marie Louise Gill ha sostenido con buenos argumentos que la noción aristotélica de sustancia solo tiene sentido cuando se aplica a organismos. Por tanto, los organismos vivos, y en especial los animales, son las sustancias o entidades individuales paradigmáticas, semovientes por naturaleza y organizadas para realizar tareas específicas mediante órganos adecuados.

Todos los seres vivos son sustancias, entidades históricas, cosas concretas, individuos. Como entidades históricas que son, los seres vivos están bien delimitados o circunscritos en el espaciotiempo, tienen límites precisos, normalmente marcados por una frontera física clara (la membrana de la célula, la piel de la rana). En ello contrastan con las rocas y los montes, las nubes y los mares, de límites difusos e imprecisos.

Desde que Rudolf Virchow introdujo en 1858 la teoría de la célula, consideramos que las células son los “átomos” de la vida y que todos los organismos o son células o están compuestos de células, son repúblicas de células. Como el ser vivo elemental que es, la célula es un individuo. Su individualidad está precisamente delimitada por su membrana. La membrana de la célula es su frontera entre ella misma y lo que no es ella, entre su mundo interior y el mundo exterior. Es como el rompeolas que protege el puerto del interior celular del oleaje y los peligros del mundo exterior. Dentro y fuera de la membrana, dos mundos distintos permanecen separados. Una típica célula de mamífero está bañada en líquido intersticial. Hay mucha más agua fuera que dentro de la célula. El agua exterior trata de penetrar en la célula por presión osmótica, pero el agua invasora constantemente va siendo achicada (bombeada hacia fuera) por las bombas de la membrana. También la concentración de iones de sodio y calcio es mucho mayor fuera de la célula que dentro. Otras bombas específicas de la membrana están trabajando todo el tiempo para sacar fuera de la célula los iones de sodio y calcio que han logrado penetrar en ella. Por el contrario, el interior de la célula (el citoplasma) es más rico en iones de potasio que el exterior y la membrana tiene que cerrar sus puertas cada vez que un ion de potasio trata de escapar. Mediante este incesante trabajo de la membrana

y sus bombas (que consume la mayor parte de la energía disponible), la célula logra neutralizar la presión del mundo exterior y mantener los desequilibrios y gradientes de los fluidos e iones, evitando la entrada del agua excesiva y de los iones de sodio y calcio y la salida de los iones de potasio, y preservando así su frágil individualidad. Todas estas operaciones de la membrana y sus bombas se llevan a cabo siguiendo las instrucciones que emanan del genoma en el núcleo de la célula, separado a su vez por otra membrana B la membrana nuclear B del resto del citoplasma.

La muerte de la célula consiste en la pérdida de su individualidad, en su fusión con el entorno. Cuando un ser vivo muere, su individualidad colapsa y se confunde con el medio ambiente que lo rodea. Los seres vivos son efímeros, frágiles, improbables, en desequilibrio termodinámico con su entorno. Este desequilibrio siempre es provisional y hay que gastar energía para mantenerlo. Cuando la energía se agota, el organismo se desorganiza, el equilibrio se restablece, la diferencia se borra, el borde se difumina, la tensión se relaja, la individualidad desaparece, el ser vivo muere.

El significado de ‘vida’

Un ser vivo es algo que vive, que tiene vida. ¿Qué significa *vida*? La palabra *vida* tiene al menos dos significados

distintos: vida en sentido biográfico y vida en sentido biológico. Aquí nos interesa este último significado. ¿Qué es la vida, en sentido biológico? Ya en 1943 Erwin Schrödinger pronunció en Dublin unas famosas conferencias sobre esta cuestión, publicadas al año siguiente en el librito titulado *What is life?* Desde entonces se han propuesto diversas definiciones de la vida, cada una de las cuales capta un aspecto esencial de los organismos vivos. El problema es que todas ellas son insuficientes y se aplican también a cosas no vivas. Pasemos revista a algunas:

(1) La definición **metabólica** de la vida: está vivo cuanto ingiere, metaboliza y excreta. Ya Aristóteles exigía la nutrición como una condición necesaria de la vida. En efecto, todos los seres vivos somos sistemas abiertos, que constantemente absorbemos de nuestro entorno materia y energía, que transformamos en nuestra propia sustancia y utilizamos para nuestras propias funciones, y cuyos residuos excretamos al exterior. Sin embargo, lo mismo puede decirse de los automóviles o de la llama de una vela.

(2) La definición **termodinámica** de la vida: está vivo cuanto permanece en desequilibrio termodinámico. En efecto, una característica fundamental de los seres vivos -la base de su improbabilidad y excepcionalidad- es su estado de desequilibrio, como ya

había recalcado Schrödinger. El segundo principio de la termodinámica afirma que la entropía (la medida física del desorden) de un sistema aislado no puede por menos de crecer. Como el universo es un sistema aislado, su entropía se incrementa continuamente; de hecho, aumenta con cada cambio que se produce en el mundo. Este principio explica la tendencia natural de los sistemas a la desorganización y al frío. El agua caliente se enfría (hasta la temperatura ambiente) espontáneamente, pero el agua fría no se calienta por sí sola. El café y la leche se mezclan espontáneamente, pero no se separan de por sí. Las máquinas se estropean, la ropa se ensucia y la habitación se desordena, casi sin darnos cuenta; pero hace falta una esforzada intervención nuestra para arreglar la máquina, lavar la ropa y ordenar la habitación. Dentro de esta tendencia general del universo hacia el desorden, la desorganización y el frío, los seres vivos representan excepciones locales. Todo organismo es una excepción cósmica, nada a contracorriente, en él se incrementan (o se mantienen) el orden, la organización y la temperatura, y se reduce la entropía. (Esto no contradice en modo alguno al segundo principio, pues los organismos no son sistemas aislados, sino sistemas abiertos a su entorno, con el que intercambian constantemente materia y energía). Sin embargo, también hay

otros sistemas abióticos en desequilibrio termodinámico, como el rayo o la capa de ozono.

Desde 1972 James Lovelock ha estado desarrollando la idea de que la Tierra es un sistema cibernético cuyos agentes reguladores serían los propios organismos que la habitan. Su conducta se modularía inconscientemente de tal modo que las condiciones físicas ambientales permanezcan estables y favorezcan la vida.

Es sorprendente que la atmósfera terrestre contenga simultáneamente y en proporción constante metano (una parte en diez mil) y oxígeno (un veintiún por ciento). En presencia de la luz solar, el oxígeno molecular y el metano reaccionan y producen dióxido de carbono y agua. Para que, a pesar de ello, el oxígeno y el metano se mantengan en esas proporciones estables en el aire, cada año hay que inyectarle mil millones de toneladas de metano (provenientes en gran parte de la fermentación bacteriana en los barros anaerobios y en los intestinos de las termitas, de los rumiantes e incluso los nuestros, de donde el metano sale a la atmósfera en forma de ventosidades) y el doble de oxígeno (procedente de la fotosíntesis). El metano actúa de regulador del oxígeno. Si hubiera mucho menos oxígeno en el aire, los organismos aerobios como nosotros nos moriríamos. Si hubiera bastante más, los bosques

arderían espontáneamente y tampoco sobreviviríamos.

Nada parecido ocurre en Marte o Venus. Aunque contratado por la NASA para ayudar a diseñar los experimentos Viking de búsqueda de vida en Marte, Lovelock no estaba bien visto en la institución, pues él mantenía que la misión a Marte era innecesaria. Bastaba con observar desde la Tierra su atmósfera (un 95 % dióxido de carbono) muerta y en equilibrio termodinámico para darse cuenta de que allí no había vida. Lovelock tenía razón, pero sus ideas no ayudaban a la NASA a obtener financiación.

(3) La definición de la vida en términos de **reproducción**: está vivo cuanto se reproduce a sí mismo, cualquier sistema autorreproductivo. En efecto, el juego de la vida es un juego reproductivo, un permanente concurso de fórmulas de autorreplicación, en el que gana quien se reproduce más y mejor. Sin duda, todos los seres vivos se reproducen a sí mismos. Por eso las macromoléculas orgánicas (como las proteínas) o incluso los virus no son seres vivos en sentido estricto, pues son incapaces de reproducirse por sí mismos. Sin embargo, hay programas informáticos (por ejemplo, los "virus" de computador) que se autorreproducen, sin estar vivos.

Su ocupación con el diseño de los primeros computadores modernos condu-

jo tanto a John von Neumann como a Norbert Wiener a establecer comparaciones formalmente precisas entre computadores y cerebros o, en general, entre máquinas y organismos. Wiener, interesado por el autocontrol, desarrolló la cibernética. Von Neumann centró su interés en la autorreproducción.

Sin duda la autorreproducción es una de las características fundamentales de los seres vivos, como ya había reconocido el mismo Aristóteles. ¿Puede haber otras cosas que se autorreproduzcan? ¿Es posible desarrollar una teoría general de la autorreproducción, que abstraiga de las contingencias de los organismos vivos terrestres? Hacia 1949 von Neumann recogió este reto, que él mismo había planteado, y le dio respuesta con el desarrollo de su teoría de los autómatas autorreproductores.

Von Neumann quería abstraer la pura estructura lógica del proceso de reproducción mismo, independientemente de su realización material concreta en los sistemas biológicos. ¿Qué tipo de organización formal basta para que un autómata controle su propia conducta de tal modo que se reproduzca a sí mismo? Primero von Neumann diseñó el modelo cinemático de una máquina que, flotando sobre un mar de elementos primitivos, sería capaz de ensamblar una copia de sí misma. Este

modelo cinemático fue más tarde abandonado a favor de un modelo sin partes, basado en la noción de autómata celular. En cualquier caso, von Neumann concluyó que en principio es posible construir máquinas que puedan reproducirse a sí mismas. Estos intentos de von Neumann fueron luego continuados por otros. En 1970, John Conway usó un tipo muy simple de autómata celular para diseñar un juego de vídeo llamado *Life* (vida), que transcurre con base en pasos discretos en la pantalla del computador. Eventualmente patrones autorreproductivos aparecen en la pantalla y empiezan a proliferar. Otros desarrollos, desde los algoritmos genéticos hasta los programas de "vida artificial" proceden de la misma fuente. De todos modos, los patrones de pixels o los programas informáticos solo están vivos en un sentido metafórico, o al menos eso piensan casi todos los biólogos.

(4) La definición de la vida en términos de **complejidad**. El problema estriba en que carecemos de una medida satisfactoria de la complejidad, en general, y de la complejidad de los organismos, en particular. Uno podría pensar, por ejemplo, en medir la complejidad de un organismo por la longitud de su genoma (es decir, por la longitud de la secuencia de bases o letras que codifican su información genética), pero los resultados de esta medida no siempre corresponden con nuestras intuiciones. Algu-



nos anfibios tienen más DNA por célula que los mamíferos (incluidos nosotros). Las cebollas tienen cinco veces más DNA por célula que los humanos, (y los tulipanes ¡diez veces más!)

Desde luego, la mera longitud del DNA es un indicador muy tosco de la complejidad. Tampoco tenemos una noción precisa de la complejidad en general. La medida matemáticamente más refinada es la de Kolmogorov: la complejidad de una secuencia es la longitud del mínimo programa que la genera (en cierta máquina universal de Turing estandarizada). Así, las numerosas partes repetitivas del llamado "DNA basura" que comprende la mayor parte del genoma de muchos organismos pueden ser en gran parte descontadas, pues pueden ser generadas por un programa relativamente corto. La reciente secuenciación de los genomas de varios organismos nos podría permitir intentar medir su complejidad de Kolmogorov, pero la tarea no tiene nada de trivial, pues se trata de una función no computable en general. En cualquier caso, esta medida no se ha computado todavía, y, si llega a hacerse, nada nos asegura que vaya a corresponder a nuestras expectativas. Según la medida de Kolmogorov, los sistemas más complejos no son los se-

res vivos (parcialmente simétricos y repetitivos), sino los completamente caóticos, como la "nieve" de la pantalla del televisor no sintonizado.

Murray Gell-Mann ha propuesto la noción de complejidad efectiva, definiéndola como la longitud de una descripción concisa de las regularidades, pero no sé si hay una descripción más concisa de todas las regularidades de una secuencia que el mínimo programa que genera la secuencia. De todos modos, mañana nos explicará él mismo su propuesta.³

(5) La definición **evolutiva** de la vida: está vivo cuanto evoluciona por selección natural. Por ejemplo, en palabras de Francis Crick, "hay un criterio útil de demarcación entre lo vivo y lo no vivo". ¿Está operando la selección natural, aunque sea de un modo muy simple? En caso afirmativo, un evento raro puede hacerse común. Si no, un evento raro se debe sólo a la casualidad y a la naturaleza intrínseca de las cosas"⁴. En efecto, Crick señala una propiedad fundamental de la vida: la de preservar los trucos improbables y milagrosos, si estos resultan eficaces (para sobrevivir y reproducirse). Por eso la teoría darwinista de la evolución es la

³ Durante el Seminario de Santiago Gell-Mann dejó claro que él no pretende una descripción de todas las regularidades, sino solo de las regularidades que interesan a un "juez" u observador, por lo que la noción así definida es relativa a dicho juez.

⁴ CRICK, Francis. *Life Itself: Its Origin and Nature*. New York: Simon and Schuster, 1981; p. 80.

mejor explicación científica de la asombrosa variedad y adaptación de los seres vivos. Las fuerzas creativas del azar (la mutación de los genes, la recombinación sexual, la deriva genética) fraguan una inmensa variedad de fórmulas o propuestas, que son luego seleccionadas por el filtro implacable de la selección natural.

También aquí se da la dificultad de que algunas de las cosas que evolucionan por selección natural no están vivas. Manfred Eigen ha aplicado exitosamente las nociones de la teoría darwinista de la evolución por selección natural a la evolución prebiótica (anterior a la vida, por definición) de las macromoléculas orgánicas. Lo mismo puede decirse de los procesos de selección clonal en el sistema inmunitario. Richard Dawkins ha aplicado la teoría darwinista a la evolución cultural de los memes (o rasgos culturales elementales), y David Hull la ha aplicado a las teorías científicas mismas. Los teóricos de la vida artificial han aplicado la teoría evolutiva a ciertos algoritmos, programas y patrones desarrollados en computadores. Por otro lado, la vida propiamente dicha que conocemos en este planeta no sólo evoluciona por selección natural, sino que también como resultado de otras fuerzas o factores, como las mutaciones aleatorias, la deriva genética (evolución neutral), la poliploidía y la simbiosis celular.

Otra dificultad suplementaria estriba en el hecho de que, hasta ahora, nadie ha sido capaz de formular una axiomatización satisfactoria de la teoría darwinista de la evolución por selección natural. Mary Williams, Elliott Sober y David Hull, entre otros, han hecho importantes aportaciones a esa tarea, pero una axiomatización satisfactoria de la teoría todavía no existe.

Si alguna vez logramos hacer precisa la noción de evolución por selección natural mediante una adecuada axiomatización, nos tropezaremos con otro problema distinto. Según el teorema de Löwenheim-Skolem, si una teoría (formalizable en la lógica de primer orden) es consistente, entonces tiene una realización en el conjunto de los números naturales y de las funciones numéricas. Por tanto, si nuestra teoría de la evolución es consistente, entonces uno de los sistemas que evolucionan por selección natural es cierta estructura matemática cuyo universo es un conjunto de números naturales y cuyas relaciones y funciones son todas numéricas. Sin embargo, no estamos inclinados a decir que una estructura matemática esté viva.

(6) La lista de definiciones a las que hemos pasado revista no pretende ser exhaustiva. Hay otras, aunque no voy a analizar aquí sus problemas. Por ejemplo, Gell-Mann caracteriza los seres vivos por el papel que desempe-

ña en ellos el procesamiento de la *información*, en especial por la notable compresión de la información acumulada a partir de la experiencia pasada en el genoma; Francisco Varela y Humberto Maturana han definido la vida como *autopóiesis* (o producción de sí mismo), mediante la cual el ser vivo se autodelimita frente al entorno por su propia dinámica; y Antonio García Bellido subraya el papel desempeñado en la vida por el *reconocimiento* molecular y celular. En resumen, ninguna de las definiciones consideradas de vida en general es satisfactoria. Quizá podríamos juntar todas las características propuestas y decir: algo es un ser vivo si y solo si es complejo, está en desequilibrio termodinámico, procesa información, metaboliza, se reproduce y evoluciona por selección natural. En cualquier caso, no parece posible caracterizar la vida en general, mientras no conozcamos más que un tipo muy especial de vida, la vida tal y como se da en el planeta Tierra. Lo que necesitamos es adquirir conocimiento sobre otros tipos de vida que pueda haber en el universo.

Ciencia teórica y ciencia histórica

El azar (la contingencia) y la regularidad (la necesidad) son como la trama y la urdimbre del tejido de la realidad. Eventos aleatorios de tipo cuántico a

nivel microfísico producen minúsculos efectos macroscópicos, a veces magnificados en su amplitud por los procesos de caos determinista.⁵ Aunque las leyes de la física y de la química describen regularidades universales, su validez es compatible con una infinita variedad de posibles cursos de eventos. También las leyes del tránsito rodado son a la vez obligatorias y compatibles con una gran multiplicidad de trayectos distintos. Los efectos de la regularidad pueden ser explicados y predichos, pero los resultados del azar solo pueden ser explorados y registrados. No todo tiene que ser como es. Muchas cosas simplemente resultan ser así, y podrían haber sido de otra manera.

Según Aristóteles, solo hay ciencia de lo universal, de lo regular y recurrente. Las indagaciones sobre lo particular, sobre lo individual y contingente son meramente historia. Él mismo llamó a sus estudios zoológicos "historia de los animales" (*Peri ton zoion historíai*). Ese sentido de la palabra "historia" ha sido preservado en la expresión *historia natural*. Por eso los museos de historia natural coleccionan multitud de especímenes individuales procedentes de los dominios de las ciencias históricas (biología, geología, astronomía, antropología cultural).

⁵ ¡Ojo!, el caos determinista no tienen nada que ver con el de Kolmogorov.

El rol de la teoría en la ciencia se ha enfatizado hasta tal punto que corremos el peligro de ofrecer una imagen distorsionada de muchas áreas de investigación, haciéndolas aparecer como mucho más cargadas de teoría de lo que actualmente son. Sin embargo, una gran parte (de hecho, la mayor parte) de la investigación científica es de tipo histórico. Por ejemplo, casi todo lo que hemos aprendido sobre el sistema solar es producto de la indagación histórica y no podría haber sido deducido de ninguna teoría concebible. Es cierto que las trayectorias de los planetas pueden ser inferidas a partir de otros hechos históricos mediante la mecánica newtoniana, pero la gran mayoría de las cosas que sabemos acerca de los planetas B incluyendo cuántos planetas hay, cuáles tienen anillos o satélites, y cuántos, y todo lo referente a su composición química, su campo magnético, su atmósfera y su relieve superficial como cráteres, volcanes y cañones B son hechos brutos que hemos averiguado por exploración histórica (por observaciones con los telescopios o por misiones llevadas a cabo mediante sondas espaciales armadas de cámaras y detectores) y no por deducción teórica.

Estadísticas o deterministas, las leyes de la física y de la química tienen pretensión de validez universal. Que nosotros sepamos, nunca ocurre lo pro-

hibido por ellas. Las regularidades establecidas en los laboratorios terrestres pueden ser extrapoladas al resto del universo, al menos en primera instancia. Este carácter universal de la física y de la química contrasta con el carácter parroquial de la biología. Los átomos de las estrellas lejanas son del mismo tipo que los átomos terrestres, los descritos en la tabla de Mendeleev. Pero no tenemos razón alguna para pensar que los seres vivos que pueda haber fuera de la Tierra se parezcan a los seres vivientes de nuestro planeta. Nuestra química es aplicable a cualquier rincón de la Vía Láctea, pero nuestra biología no.

Desde Carl Sagan hasta Richard Dawkins, muchos científicos han lamentado el provincialismo de nuestra biología, limitada al estudio de los organismos que (en gran parte por casualidad) han evolucionado en nuestro planeta Tierra. La vida en la Tierra es un individuo, no un universal. Nuestra biología es la biografía de ese individuo. Y las biografías no son extrapolables. Quizás las dificultades antes reseñadas con la definición de la vida tienen que ver con el hecho de que la única vida que conocemos es la vida en la Tierra y la *vida en la Tierra* no es un concepto, sino un nombre propio.

Muchos rasgos intrincados compartidos por todos los organismos vivos de la Tierra no son consecuencias de las le-

yes de la física ni de constreñimientos químicos o estructurales. La única explicación de su presencia ubicua en los seres vivientes de la Tierra es que esos rasgos han sido heredados de un antepasado común. Todas las criaturas vivas de nuestro planeta descienden de un ancestro común. Por eso compartimos tantas características, desde la química básica de las moléculas orgánicas disueltas en agua hasta el código para traducir la información contenida en los ácidos nucleicos en estructura de proteínas. No sabemos cuáles de estas características resultan de regularidades universales y cuáles otras son simplemente accidentes surgidos al azar y transmitidos por herencia de una generación a otra. Quizá nuestra biología tiene una parte general o teórica, válida en todas partes, y otra parte meramente histórica y descriptiva, válida solo en la Tierra. Pero incluso si esto fuera así, sería imposible separar ambas partes, mientras nuestro conocimiento de la vida se limite al planeta Tierra.

Cada biosfera es un individuo vivo y cohesivo. Sólo el conocimiento de muchas biosferas diferentes nos permitiría separar los rasgos universales de la vida (debidos a constreñimientos físicos) de las contingencias aleatorias de la vida en la Tierra. Sólo entonces tendríamos una biología teórica insertada en la física, y no simplemente la descripción histórica (la biografía, por así decir) de un individuo particular. Y

sólo en ese caso podrían tener algún sentido nuestras vagas discusiones sobre la probabilidad de la vida extraterrestre o incluso sobre la probabilidad del origen de la vida en la Tierra misma. En efecto, las probabilidades se asignan a conjuntos de casos, no a casos singulares.

¿Es la vida un chiste cósmico o un imperativo cósmico? ¿Es la vida una rara excepción en un universo abiótico o una ocurrencia frecuente en un universo hormigueante de vida? Muchos biólogos (como Ernst Mayr), piensan que el origen de la vida en la Tierra fue un evento aleatorio, feliz y sumamente improbable, casi un milagro, mientras que otros (como Christian de Duve, autor del libro significativamente titulado *Vital Dust: Life as a Cosmic Imperative*) mantienen la posición contraria. Iris Frey ha llamado a esos grupos el “campo del casi milagro” y el “campo de la ley”. Esta discusión no puede dirimirse con argumentos y consideraciones a priori. Ambas hipótesis son compatibles con las leyes de la física y sólo la futura observación de formas de vida en planetas de otras estrellas podrá zanjar la cuestión.

Bases materiales alternativas para la vida

La vida que conocemos, la vida en el planeta Tierra, es una forma de vida química, basada por tanto en la fuerza

electromagnética. ¿Hay vida basada en otras fuerzas? Toda la química (la estructura de las moléculas y la dinámica de las reacciones) se explica completamente por las interacciones electromagnéticas entre los átomos. Las tres fuerzas fundamentales de la naturaleza son la interacción nuclear fuerte (responsable de la cohesión interna de los núcleos atómicos y del confinamiento de los quarks en bariones), la fuerza electrodébil y la fuerza de la gravitación. A temperaturas normales⁶ la fuerza electrodébil se manifiesta como dos fuerzas distintas: la interacción electromagnética y la interacción nuclear débil (responsable de la desintegración radioactiva beta). A la escala de las moléculas la interacción electromagnética es la fuerza dominante, casi 10^{40} veces más poderosa que la gravitación.⁷ Nuestra biología es molecular, está gobernada por el electromagnetismo. ¿Son concebibles otras posibilidades?

Aunque nadie ha sugerido formas de vida basadas en la interacción nuclear débil, Frank Drake ha imaginado cómo una forma de vida muy diferente podría estar basada en la interacción nuclear fuerte. Pensaba en vidas extremadamente rápidas y cortas (de quizá 10^{-15} s) de núcleos muy pesados en intensa interacción mutua en la superfi-

cie de estrellas de neutrones. Goldsmith y Owen han sugerido una forma de vida basada en la fuerza gravitacional, en que galaxias enteras alcanzan la condición de vivientes. La dificultad aquí estriba en que las interacciones entre las estrellas serían tan lentas que el sistema entero requeriría para su evolución hacia la vida un tiempo mayor que la edad del universo. Incluso respecto a la vida basada en el electromagnetismo, Fred Hoyle ha imaginado una enorme nube intergaláctica alimentada por la luz de las estrellas y coordinando la conducta de sus partes mediante señales de radio. Desde luego, todas estas extravagantes posibilidades tienen más que ver con la ciencia ficción que con la ciencia a secas, pero algo así de raro no puede ser excluido a priori. En ausencia del constreñimiento de los datos empíricos, no hay manera de embridar la fantasía.

A partir de ahora limitaremos nuestras especulaciones a las formas químicas de vida en la superficie de planetas.

Más del 95 % (en peso) de la materia viva está compuesta por los cuatro elementos hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno. Estos son cuatro de los seis elementos más abundantes en el universo; los otros dos son los gases iner-

⁶ Temperaturas normales son aquí las temperaturas inferiores a la temperatura crítica a la que se supone que se produce la ruptura de la simetría electrodébil, es decir, $T < 10^{15}$ kelvin.

⁷ Más exactamente, la fuerza electrostática ejercida entre el protón y el electrón del átomo de hidrógeno es $2,27 \times 10^{39}$ veces mayor que la fuerza gravitacional entre ambas partículas.

tes helio y neón, que no forman compuestos químicos. El alto porcentaje de agua en todos los organismos explica su alto contenido en hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, el carbono y el nitrógeno son relativamente raros en la Tierra; en cualquier caso, más raros que el hierro, el silicio o el magnesio, que son (junto con el oxígeno) los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Desde este punto de vista nos parecemos más al universo en general que a nuestro propio planeta. En cualquier caso, la abundancia cósmica de elementos químicos no constituyen impedimento alguno a la prevalencia de la vida en el universo.

Carbono y silicio como unidades estructurales

La vida tal como la conocemos en la Tierra se basa en los compuestos de carbono. La presencia prominente del carbono en la materia viva se debe tanto a la singular capacidad de los átomos de carbono para formar moléculas largas, intrincadas y complejas, aptas para almacenar gran cantidad de información y para catalizar todo tipo de reacciones, como a su capacidad para formar con el nitrógeno y el oxígeno enlaces químicos robustos, pero rompibles, combinando así estabilidad con aptitud para reaccionar con otras moléculas.

Algunos científicos piensan que cualquier forma de vida que pueda haber

estará basada en el carbono. El carbono es un elemento muy versátil. Puede combinarse con cuatro átomos de hidrógeno (el máximo que un átomo puede aceptar) para formar una molécula estable, el metano. Ya hemos mencionado la capacidad del carbono para formar moléculas largas y complejas. Ningún otro elemento químico es comparable al carbono por la variedad y complejidad de los compuestos que puede formar. El oxígeno sólo se puede combinar de dos maneras con el hidrógeno, dando lugar al agua (H_2O) o al agua oxigenada (H_2O_2). El nitrógeno sólo se puede combinar de dos maneras con el hidrógeno, dando lugar al amoníaco (NH_3) o a la hidracina (N_2H_4). Por contraste, el carbono se puede combinar de muchos modos diferentes (nadie sabe cuántos) con el hidrógeno. El carbono forma millones de compuestos diferentes conocidos, lo que da idea de la inmensa variedad de su comportamiento químico. Algunos de esos compuestos de carbono constituyen la materia prima de la que está hecha la vida tal como la conocemos en la Tierra.

A veces se ha sugerido el silicio como una alternativa al carbono en una posible bioquímica alienígena. En efecto, el silicio se combina también con cuatro átomos de hidrógeno, pero da lugar a un número escaso de moléculas capaces de almacenar información. Las moléculas biológicas necesitan ser

lo suficientemente estables como para que los enlaces químicos que las mantienen unidas no se rompan en cuanto se eleve un poco la temperatura. El enlace entre dos átomos de silicio es sólo la mitad de fuerte que entre dos átomos de carbono. Además, y como señaló Carl Sagan, el equivalente silícico al dióxido de carbono (CO_2), el dióxido de silicio (SiO_2), que es el principal componente de la arena y del vidrio, es un sólido, no un gas, en las superficies de los planetas. Esto podría constituir una dificultad grave para el desarrollo de un metabolismo basado en el silicio. De todos modos, no puede excluirse a priori la posibilidad de formas de vida basada en el silicio.

Agua y amoníaco como disolventes

La vida que conocemos se basa no solo en el carbono como elemento estructural, sino también en el agua como disolvente. El agua líquida proporciona un medio estable en el cual las moléculas orgánicas pueden disolverse e interactuar. Las moléculas de la vida necesitan agua para formarse y las enzimas para desplegarse. Las reacciones vitales tienen lugar en el agua, sus ingredientes son transportados por el agua y sus desechos son eliminados a través del agua. Los seres vivos de nuestro planeta nadan en agua o, si se han adaptado a la vida en tierra firme, llevan consigo el agua que necesitan.

De hecho, la vida se adapta a cualquier ambiente, por hostil que parezca, mientras haya agua en estado líquido. Hay organismos adaptados al hielo de la Antártida (que contiene gotas de agua líquida), a los géiseres o a las fuentes termales de agua sulfurosa que surgen en el fondo del océano a tres mil metros de profundidad. Los seres vivos (bacterias o humanos) son agua en un 70 % (de su peso).⁸

Procesos de vida alienígena podrían utilizar disolventes distintos del agua. Obviamente un disolvente tiene que poder disolver otros compuestos químicos. Como candidatos alternativos plausibles se han sugerido el amoníaco líquido (NH_3), el alcohol metílico (CH_3OH) y el fluoruro de hidrógeno líquido (HF). El agua tiene una capacidad mucho mayor que el amoníaco o el alcohol metílico para admitir otras moléculas en solución. El fluoruro de hidrógeno podría aproximar esa capacidad disolvente del agua, pero la abundancia cósmica del flúor es escasa. Un buen solvente debería ayudar a los organismos a regular su temperatura. Una alta tensión superficial (la tendencia a formar gotas) también sería favorable para la evolución de las células. La tensión superficial del agua es el doble que la del amoníaco y el triple que la del alcohol metílico. Desde todos estos puntos de vista, el agua es el mejor disolvente.

Con un cierto provincialismo hidrófilo, solemos definir la "zona habitable" en torno a una estrella como el abanico de distancias (desde la estrella) dentro del que puede haber agua líquida en la superficie de un planeta. Por eso estamos tan interesados en saber si hay o ha habido agua en Marte (o en el satélite joviano Europa, que, aunque está fuera de la zona habitable, podría tener agua líquida bajo su capa de hielo). Para ser útil en otros planetas, un disolvente debe permanecer en fase líquida en un amplio abanico de temperaturas típico de las superficies planetarias, de tal modo que las variaciones de temperatura en esos planetas no lo hagan congelarse o hervir. El amoníaco sería un mal disolvente en nuestro planeta, pues no es líquido a las temperaturas habituales en la superficie terrestre. Sin embargo, en planetas muy fríos, donde el agua está permanentemente congelada, otros disolventes, como el amoníaco, podrían dar lugar a otro tipo distinto de bioquímica. En efecto, el amoníaco es líquido entre 195 K (= B 78 1C) y 249 K (= B 24 1C), mientras que el agua sólo se licúa a los 273 K (= 0 1C). Todavía mejor, desde esta perspectiva, es el alcohol metílico, que permanece líquido entre los 179 K y 432 K. A bajas temperaturas, ciertas clases de moléculas requieren muy poca energía de activación para reaccionar químicamente, pero no las conocemos bien. En resumen, aunque el agua es un disol-

vente excelente, hay alternativas al agua y algunas de ellas podrían resultar superiores en ambientes muy diferentes (por ejemplo, mucho más fríos).

Polímeros

Dejando de lado otras posibilidades más exóticas de vida química, consideremos a partir de ahora solo formas de vida basadas en el carbono como elemento estructural y en el agua como disolvente, tal y como ocurre en la Tierra.

La mayor parte de las moléculas de la vida son polímeros, cadenas complejas que tienen como eslabones unas moléculas orgánicas bastante simples llamadas monómeros. Entre los polímeros se cuentan las proteínas (hechas de aminoácidos), los ácidos nucleicos (compuestos de nucleótidos) y los polisacáridos (hechos de monosacáridos). Las moléculas orgánicas son muy comunes en el universo. Se han encontrado en los meteoritos carbonáceos caídos en la Tierra y sus huellas aparecen en el espectro de la luz que atraviesa las grandes nubes de gas y polvo de nuestra galaxia. La mayor parte de los monómeros que componen los polímeros de la vida en la Tierra han sido ya sintetizados en el laboratorio a partir de moléculas muy abundantes en el espacio exterior.

El último ancestro común de los organismos de este planeta ya poseía un

sistema dual de ácidos nucleicos para el almacenamiento de la información y la replicación, y de proteínas para todo lo demás, incluida la catálisis de la replicación de los ácidos nucleicos. Este sistema es interdependiente en el sentido de que los ácidos nucleicos no pueden sintetizarse sin la ayuda de ciertas proteínas, mientras que las proteínas no pueden ensamblarse sin las instrucciones contenidas en los ácidos nucleicos. Este rompecabezas ha llevado a los científicos a postular sistemas de vida diferentes y más simples en el origen de la vida.

Actualmente el modelo del origen de la vida más en boga es el de un mundo previo de RNA, en el cual el RNA autocatalítico desempeñaría ambas funciones a la vez. Los experimentos han mostrado que ciertos tipos de RNA que ocurren en la naturaleza, llamados ribozimas, podrían actuar como sus propios enzimas. Por tanto, podrían haber sido los precursores de los modernos organismos duales, basados en el DNA. Los ribozimas que se dan en la naturaleza no son muy versátiles, pero en el laboratorio se han producido versiones perfeccionadas. Una es el RNA piranosol (pRNA), que incorpora un tipo diferente de ribosa. Otra es el ácido nucleico péptido (PNA), un polímero de diseño que combina rasgos de las proteínas (la "columna vertebral" o soporte) y de los ácidos nucleicos (las bases o nucleótidos de

las cadenas laterales). El PNA, que es una molécula mucho más simple que el RNA, tiene además la doble capacidad de autorreplicarse y de catalizar reacciones. Leslie Orgel y otros piensan que algo así como un PNA simple vino primero, siendo luego sustituido por el RNA autocatalítico, para finalmente dar lugar al sistema dual con DNA y enzimas proteicas, que es el único que se ha perpetuado hasta nuestros días.

Dejemos ahora de lado otras posibles moléculas orgánicas (como el PNA) y consideremos solo formas de vida muy similares a la nuestra, construidas con proteínas y ácidos nucleicos.

Aminoácidos y proteínas

Los aminoácidos son los componentes estructurales o monómeros de ese tipo especial de polímeros que son las proteínas. Estos monómeros se llaman aminoácidos porque (con una excepción, la prolina) todos contienen un grupo amino (BNH_2) y un grupo carboxilo (B COOH). Todos los aminoácidos están contruidos de acuerdo con el mismo diseño básico: un átomo de carbono central, enlazado con un grupo amino, un grupo carboxilo, un átomo de hidrógeno y un grupo variable, llamado cadena lateral. La cadena lateral es específica del aminoácido de que se trate y le confiere sus características peculiares. El resto es idéntico en todos los aminoácidos

Las proteínas constan de una “columna vertebral” compuesta de los elementos repetitivos de los aminoácidos, enlazados entre sí mediante enlaces péptidos, y de la consiguiente serie de cadenas laterales distintas. Cada proteína está plegada y doblada de una intrincada forma tridimensional, que le permite llevar a cabo su función catalítica o estructural. Las proteínas se ensamblan en los ribosomas, siguiendo las instrucciones genéticas aportadas por el RNA mensajero como secuencias lineales de aminoácidos. La secuencia lineal unidimensional determina el pliegue tridimensional de la proteína, que a su vez determina sus funciones.

Hay una inmensa variedad de aminoácidos posibles, tantos como cadenas laterales orgánicas. Por tanto resulta sorprendente que tan sólo 20 tipos distintos de aminoácidos sean usados por la vida en la Tierra para fabricar proteínas. Existen muchos otros tipos de aminoácidos y algunos pueden encontrarse incluso dentro de la propia célula.

En 1952 Stanley Miller y H. Urey realizaron el primer experimento que pretendía reproducir las condiciones prevalentes en la Tierra cuando se originó la vida. Reprodujeron en un matraz una “atmósfera” consistente en una

mezcla de vapor de agua (H_2O), metano (CH_4), amoníaco (NH_3) e hidrógeno (H_2), sometida a frecuentes descargas eléctricas (los “rayos”). El experimento produjo dentro del matraz muchas moléculas orgánicas, incluyendo varios aminoácidos encontrados en las proteínas, como la glicina o la alanina, pero también muchos otros aminoácidos no encontrados en las proteínas, como la norvalina o la sarcosina. Más tarde (en 1969) el análisis de un meteorito carbonáceo que había caído cerca de Murchison (Australia) mostró que contenía 52 aminoácidos diferentes, la mayoría de los cuales eran de tipos ausentes en las proteínas.

Todos los aminoácidos son asimétricos en torno a su átomo de carbono central, por lo que tienen quiralidad o simetría especular, como la mano (*kheir*, en griego). Cada aminoácido puede presentarse en dos versiones: levógiro o destrógiro, de mano izquierda o derecha. Los compuestos abióticos presentan el mismo número de aminoácidos destrógiros que levógiros. Los aminoácidos que se obtienen en los experimentos de tipo Miller-Urey y los aminoácidos hallados en los meteoritos son de quiralidad mixta, en torno al 50 % de izquierda, el otro 50 % de derecha. Sin embargo, todos los aminoácidos usados por la vida en la Tierra (con la

excepción de la glicina, que carece de mano) son levógiros, nunca destrógiros. La quiralidad izquierda de los aminoácidos biogénicos surgió presumiblemente al azar y fue preservada por herencia.

En la vida alienígena las proteínas podrían estar hechas de otros tipos de aminoácidos que en la Tierra, y el número de aminoácidos entre los que elegir no tendría por qué ser 20, podría ser 15 o 64 o 200. La proteínas terrestres constan siempre de los mismos 20 aminoácidos. Pero, aun así, una proteína típica, que contenga unos 100 aminoácidos, podría ser hecha de 20^{100} ($=10^{130}$) maneras distintas, produciendo una enorme variedad de proteínas (más que el número de partículas elementales en el universo observable). No todas las combinaciones de aminoácidos forman proteínas estables y funcionales; muchas no pueden, y se degradan rápidamente. De todos modos, otras muchas combinaciones serían estables, si se usaran, pero los seres vivos de la Tierra nunca las utilizan. La mayoría de los organismos ensamblan y usan menos de 100.000 tipos de proteínas. La vida en la Tierra es muy selectiva y usa solo una pequeña fracción de las moléculas que podría usar. No sería de esperar que otra forma de vida, incluso si estuviera basada en las proteínas, hiciera exactamente la misma estrecha selección de posibilidades.

Nucleótidos, ácidos nucleicos y código genético

La reproducción con herencia de estructura requiere un sistema de almacenamiento y transmisión de la información. En los organismos terrícolas este sistema se basa en la doble hélice del DNA. El DNA es un ácido nucleico, un polímero compuesto de nucleótidos como monómeros. Otro ácido nucleico es el RNA. En la célula, el DNA almacena la información genética; el RNA la copia, traduce y expresa en forma de proteínas. Cada nucleótido consta de un azúcar (ribosa en el RNA, desoxiribosa en el DNA) y un fosfato, siempre iguales, y de una base nitrogenada distinta, peculiar de ese nucleótido. Ambos ácidos nucleicos constan de una "columna vertebral" de elementos repetitivos (el azúcar y el fosfato), portadores de las diversas bases, cuya secuencia codifica y almacena la información.

Sólo hay cuatro tipos de nucleótidos en el DNA. Cada uno de ellos se caracteriza por su distinta base nitrogenada (adenina, timina, guanina y citosina) adherida a su elemento repetitivo. Muchas otras bases diferentes podrían haber sido usadas para formar nucleótidos, pero la vida en la Tierra sólo ha elegido esas cuatro. Un código de cuatro letras fue fijado por nuestro último ancestro común y subsiguientemente fue heredado por todos los seres vivos de la Tierra.



El DNA sólo se reproduce dentro de la célula y con ayuda de las enzimas de la célula, como un virus. Por tanto, ni el DNA ni el virus están vivos en ningún sentido estricto de 'vida' que implique autorreproducción. Los seres vivos más simples son las células. Dentro de la célula, el DNA dirige la síntesis de proteínas, que tiene lugar en los ribosomas. Las instrucciones para hacer una proteína están en un gen (un cierto fragmento de DNA). Primero se hace una copia de trabajo del gen en RNA mensajero. Luego se transporta esa copia hasta un ribosoma, donde se ensambla la proteína. La secuencia de bases del RNA mensajero determina la secuencia de aminoácidos de la proteína ensamblada, que a su vez induce el pliegue y estructura tridimensional de la proteína, lo que determina su función.

Dado el alfabeto de cuatro letras del DNA (o del RNA, con uracilo en vez de timina), hay diversas posibilidades de codificar la secuencia de aminoácidos de las proteínas. Con un código basado en palabras de una sola letra (donde cada letra o nucleótido codificaría un aminoácido) solo pueden codificarse $3 (= 4^1 - 1)$ aminoácidos diferentes (teniendo en cuenta que una palabra debe ser reservada como signo de final o *stop*). Con un código de dos letras podrían codificarse $15 (= 4^2 - 1)$ aminoácidos. Con un código de tres

letras (como el actualmente usado por la vida en la Tierra) se pueden codificar $63 (= 4^3 - 1)$ aminoácidos. Puesto que solo hay que codificar los 20 únicos aminoácidos usados por la vida terrestre para hacer proteínas, este código presenta cierta redundancia. Suele ocurrir que varias palabras diferentes codifican el mismo aminoácido. Así, por ejemplo, las distintas palabras (en RNA) CGU, CGC, CGA y CGG codifican todas el mismo aminoácido, arginina. Y las palabras GCU, GCC, GCA y GCG codifican también todas ellas el mismo aminoácido, alanina.⁹

Supongamos (lo que es mucho suponer) que una forma alienígena de vida tenga la misma constitución bioquímica que nosotros, que almacene la información en una doble cadena de nucleótidos parecida a nuestro DNA y que las moléculas codificadas sean proteínas hechas de los mismos 20 tipos de aminoácidos que componen las nuestras. A pesar de ello, todavía son concebibles diversas variaciones en el ácido nucleico (parecido a nuestro DNA) codificante y en el código mismo usado en la codificación. Incluso si pensamos en un alfabeto de cuatro bases o nucleótidos, las bases elegidas podrían ser otras que las terrestres. Pero el alfabeto no tiene por qué usar precisamente cuatro letras o bases. Podría usar solo dos. Este alfabeto binario se-

⁹ El código genético es ligeramente distinto en las mitocondrias.

ría suficiente, con tal de incrementar la longitud de la palabra o codón de 3 a 5 bases, ya que $2^5 = 32 > 20$. También podríamos usar, por ejemplo, un alfabeto de 5 letras, en cuyo caso podríamos reducir la longitud de la palabra o codón de 3 a 2 bases, pues $5^2 = 25 > 20$. Por otro lado, la traducción de codones en aminoácidos podría ser diferente.

La ausencia de redundancia tiene la ventaja de la economía y la desventaja de la fragilidad. Cuanto más redundante es el código, tanto menos económico es, pero tanto más robusto. Qué combinación de economía y robustez resulte óptima es algo que no está definido. El actual compromiso es meramente el resultado histórico de contingencias terrestres; no tiene por qué ser óptimo en ningún sentido.

El ATP como depósito de la energía
Todos los seres vivos están en desequilibrio termodinámico con su entorno y tienen que gastar energía en permanecer vivos. Tienen que gastar energía para hacer funcionar las bombas de las membranas de sus células, para replicar su DNA, para sintetizar la enorme variedad de macromoléculas orgánicas que están siendo ensambladas continuamente, para contraer los músculos, para moverse, para secretar hormonas, para crecer, para reproducirse. Toda esta energía es generada en los procesos de fermentación, respiración o fo-

tosíntesis, e inmediatamente es guardada (ahorrada, por así decir) en forma de ATP (trifosfato de adenosina), un nucleótido con tres fosfatos. La célula invierte la energía obtenida en la operación de enlazar esos fosfatos. Los enlaces fosfoanhídridos entre los fosfatos almacenan la energía ahorrada. Cuando estos enlaces son rotos por hidrólisis, generan energía libre, inmediatamente usable para realizar cualquier tipo de trabajo. Así, cuando se hidroliza el tercer enlace fosfoanhídrido del ATP, se produce ADP (difosfato de adenosina) y energía libre.

El ATP es la moneda energética universal de la vida terrestre. Todos los seres vivos, desde las bacterias hasta los primates, invertimos nuestra recién ganada energía en ATP. Cada célula tiene sus ahorros de energía en su cuenta corriente de ATP. Cada vez que necesitamos hacer algo, nuestras células lo hacen obteniendo la energía libre requerida de su ATP y gastándola en hacerlo. Otras moléculas y mecanismos podrían ser usados para ejercer la misma función. De hecho, y aunque preponderante, el ATP no es la única moneda energética de la vida terrestre. Un papel parecido es desempeñado por el bombeo selectivo de iones de hidrógeno, potasio y sodio a través de la membrana celular. Y otros nucleótidos (como GTP o UTP) comparten en alguna medida el rol del ATP como de-

pósito celular de energía. De todos modos, la prominencia y universalidad del ATP como base energética de todo el metabolismo de la célula sólo puede explicarse por la herencia compartida a partir de un ancestro común. Si hay vida fuera de la Tierra, difícilmente puede esperarse que base su economía energética en el ATP en la extensa medida que lo hace la vida terrestre.

La célula eucariota

La mayor diferencia entre los organismos estriba en el tipo de células de que están hechos. Todos los seres vivos terrestres se dividen en procarios (*Prokarya*) y eucarios (*Eukarya*), según que consten de una sola célula procariota (pequeña y sin núcleo ni cromosomas) o estén compuestos de una o muchas células eucariotas (grandes y con núcleo y cromosomas). La vida surgió en la Tierra hace unos 3.800 millones de años, poco después de que hubiera acabado el periodo de inestabilidad producido por el continuo bombardeo inicial de la superficie terrestre por planetoides, meteoritos y cometas. Durante más de mil millones de años todos los organismos eran procarios (bacterias y arqueas). Parece que hace unos 2.500 millones de años se formaron las primeras células eucariotas. Estas suelen ser unas 10.000 veces más grandes (en volumen) que las procariotas y tienen una estructura mucho más compleja: su genoma está

organizado en cromosomas encerrados dentro de un núcleo separado del resto de la célula por una membrana nuclear; entre la membrana nuclear y la celular está el protoplasma, repleto de una gran diversidad de orgánulos, como las mitocondrias, que producen la energía de la célula. Estas mitocondrias tienen su propio DNA, distinto del DNA de los cromosomas y procedente sólo de la madre (en los organismos sexuales).

Poco antes del surgimiento de las primeras células eucariotas, las cianobacterias habían inventado la fotosíntesis y habían empezado a llenar los mares y la atmósfera de oxígeno libre, venenoso para la mayoría de los organismos entonces vivientes, creando así la mayor crisis ecológica de todos los tiempos. Mientras muchos organismos se iban extinguiendo, es de suponer que se ensayarían diversas soluciones desesperadas, en general condenadas al fracaso. Una de ellas, sin embargo, desembocó en la creación de la célula eucariota, seguramente por invasión o fagocitosis de unas bacterias por otras, estabilizada en forma de simbiosis en la que la bacteria grande engullidora proporciona alimento a las bacterias pequeñas engullidas, capaces de generar energía por respiración aerobia, de la que la grande también se aprovecha. Este escenario propuesto por Lynn Margulis y Christian de Duve tiene gran verosimilitud. El hecho mismo de que las mitocondrias tengan su propio

DNA indica bien a las claras que descienden de las citadas bacterias aerobias.

En cualquier caso, los encuentros aleatorios entre bacterias y los azarosos y mal conocidos procesos de fagocitosis y simbiosis que finalmente desembocaron en nuestras células eucariotas son un paradigma de contingencia irrepetible. Podría no haber habido fotosíntesis. Incluso de haberla habido, podría haber generado una crisis sin solución, o las soluciones podrían haber venido de procesos distintos o de formas diferentes de simbiosis, y los simbiontes podrían haber sido bacterias muy diferentes de aquellas que dieron lugar a las células eucariotas actuales y a sus mitocondrias, plásmidos y peroxisomas. Así habrían resultado células complejas comparables a las eucariotas, pero distintas. En vez de los protistas, hongos, animales y plantas actuales podrían haber resultado organismos sorprendentes, algo así como animales que se alimentasen de la luz solar o incluso de otra radiación, organismos enormes e inmortales, quién sabe qué. Incluso si supo-

nemos (contra toda plausibilidad) que en otro planeta se haya desarrollado un tipo de vida con nuestra misma constitución bioquímica de carbono, agua, ácidos nucleicos y proteínas y que en él hayan estado presentes exactamente los mismos tipos de bacterias que existían en la Tierra hace 2.500 millones de años, todavía sería prácticamente imposible que surgieran las mismas células eucariotas, y todavía más imposible que la historia se repitiera y acabasen evolucionando los mismos tipos de organismos que aquí. En definitiva, si hay vida fuera de la Tierra, seguro que será diferente de la que conocemos. Cuáles sean las diferencias es algo que no sabemos y que solo podremos aprender de futuras observaciones.

La sabiduría requiere autoconciencia. Para saber quiénes somos y en qué tipo de universo vivimos, para decidir si somos milagros únicos o ciclos regulares del devenir cósmico, necesitamos averiguar si hay vida extraterrestre y cuáles son sus características. Solo entonces podremos responder con alguna precisión a la pregunta de qué es la vida.

CRICK, Francis. *Life Itself: Its Origin and Nature*. New York: Simon and Schuster, 1981.

DE DUVE, Christian. *Vital Dust: Life as a Cosmic Imperative*. New York: Basic Books, 1995.

DE DUVE, Christian. The Birth of complex Cells. *Scientific American*, April, 1996; pp. 38-45.

FRY, Iris. Are the Different Hypothesis on the Emergence of Life as Different as they seem? *Biology & Philosophy*, vol 10, n. 4, 1995.

GELL-MANN, Murray. *The Quark and the Jaguar*. Little, Brown and Co, 1994.

GILL, Marie Louise. *Aristotle on Substance: The Paradox of Unity*. Princeton University Press, 1989.

GOLDSMITH, Donald & Tobias Owen. *The Search for Life in the Universe* (2nd edition). Addison-Wesley, 1992.

MOSTERÍN, Jesús. Life Elsewhere. *Proceedings of the 1st International Conference on Philosophy of Science*. Vigo University Press, 1998.

MOSTERÍN, Jesús. *Ciencia viva*. Madrid: Espasa-Calpe, 2001.

MOSTERÍN, Jesús y TORRETTI, Roberto *Diccionario de Lógica y Filosofía de la Ciencia*. Madrid: Espasa-Calpe, 2002.

MUNSON, Ronald. Is Biology a Provincial Science? *Philosophy of Science*, 42.1975: 428-447.

VON NEUMANN, John.. *Theory of Self-Reproducing Automata*. (ed. by A. Burks). Urbana: Illinois University Press, 1966