

**UNED**

**Facultad de Filosofía**

**Máster en Filosofía Teórica y Práctica**

**Especialidad de Lógica, Historia y Filosofía de la Ciencia**

**UN ANÁLISIS CRÍTICO DE LA CONCEPCIÓN  
DE VIDA COMO AUTONOMÍA**

**Trabajo de fin de máster presentado por**

**Federico Vega Cuesta**

**bajo la dirección de**

**Cristian Saborido Alejandro**

**Madrid, junio de 2013**

# AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a Cristian Saborido, que me ha dirigido en la realización de este trabajo de fin de máster. Su ayuda ha sido fundamental para enfocar mi propuesta inicial, poco concreta y demasiado amplia, debido, sin duda, a mi deslumbramiento por un tema tan interesante como la vida. El profesor Saborido supo entender lo que era mi verdadero interés y me acercó a la bibliografía adecuada. Durante el proceso de elaboración del trabajo contribuyó a que la estructura y la redacción del documento final facilitasen la comprensión del análisis realizado. Me ayudó a evitar errores de fondo y de forma.

También soy deudor de todos los autores en cuyas obras me he apoyado para analizar la concepción de vida como autonomía. Su presencia en mi trabajo está en las abundantes citas y referencias. Tengo que destacar lo que he recibido de Álvaro Moreno, Kepa Ruiz-Mirazo, Stuart Kauffman, Ilya Prigogine e Iris Fry.

Los errores que puedan encontrarse en el texto son de mi exclusiva responsabilidad.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |        |
|---|--------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | - 1 -  |
| <b>CONCEPCIONES DE VIDA</b> .....   | - 3 -  |
| <b>1. Naturaleza de la vida</b> .....   | - 3 -  |
| <b>2. Definición y explicación de vida</b> .....                                  | - 5 -  |
| <b>3. La autonomía como concepción de vida</b> .....                              | - 6 -  |
| <b>LA VIDA COMO AUTONOMÍA</b> .....   | - 8 -  |
| <b>4. El enfoque de la autonomía</b> .....  | - 8 -  |
| <b>5. El concepto de autonomía y la definición de vida: cuatro enfoques</b> ..... | - 9 -  |
| 5.1 La autopoiesis de Maturana y Varela .....                                     | - 9 -  |
| 5.2 El chemoton de Gánti .....  | - 10 - |
| 5.3 El agente autónomo de Kauffman .....  | - 13 - |
| 5.4 El sistema autónomo básico de Ruiz-Mirazo y Moreno .....                      | - 15 - |
| 5.5 La autonomía: recapitulación .....  | - 17 - |
| <b>6. Autonomía y vida</b> .....  | - 20 - |
| 6.1 Autonomía, función y agencia .....  | - 20 - |
| 6.2 De la autonomía básica al ser vivo .....                                      | - 22 - |
| 6.3 Autonomía, evolución y vida .....   | - 25 - |
| 6.4 Causalidad, autonomía y vida .....  | - 26 - |
| <b>7. Naturalización del concepto de autonomía biológica</b> .....                | - 28 - |
| <b>DEL MUNDO FÍSICO A LA AUTONOMÍA BIOLÓGICA</b> .....                            | - 30 - |
| <b>8. Introducción</b> .....  | - 30 - |
| <b>9. Condicionantes del mundo físico</b> .....                                   | - 31 - |
| 9.1 Física fundamental y cosmología .....   | - 31 - |
| 9.2 Termodinámica .....   | - 33 - |
| <b>10. A partir del átomo: química y organización</b> .....                       | - 37 - |
| 10.1 Estabilidad y autoensamblaje .....   | - 37 - |

|  |  |               |
|--|--|---------------|
| 10.2   | Autoensamblaje y autoorganización .....                        | - 38 -        |
| 10.3   | Automantenimiento e infraestructura .....                      | - 40 -        |
| <b>11.</b>   | <b>Complejidad y diversidad .....</b>                          | <b>- 42 -</b> |
| 11.1   | Ciencias de la complejidad .....                               | - 42 -        |
| 11.2   | Diversidad: hacia lo adyacente posible .....                   | - 44 -        |
| 11.3   | Diversidad: una justificación .....                            | - 45 -        |
| <b>12.</b>   | <b>Componentes de un sistema autónomo .....</b>                | <b>- 47 -</b> |
| 12.1   | Autocatálisis .....  | - 47 -        |
| 12.2   | Membrana .....   | - 48 -        |
| 12.3   | Energía.....   | - 50 -        |
| <b>RECAPITULACIÓN Y TEMAS ABIERTOS .....</b>                 |  | <b>- 52 -</b> |
| <b>13.</b>   | <b>Naturalización de la autonomía biológica .....</b>          | <b>- 52 -</b> |
| 13.1   | Pasos dados.....   | - 52 -        |
| 13.2   | Cabos por atar.....  | - 54 -        |
| <b>14.</b>   | <b>Capacidad de evolución abierta.....</b>                     | <b>- 55 -</b> |
| 14.1   | Vida y selección natural.....                                  | - 56 -        |
| 14.2   | Cuellos de botella .....                                       | - 57 -        |
| <b>15.</b>   | <b>El origen de la vida.....</b>                               | <b>- 60 -</b> |
| 15.1   | La hipótesis Oparin-Haldane y la tesis de la continuidad ..... | - 60 -        |
| 15.2   | Las etapas de la evolución prebiótica .....                    | - 62 -        |
| 15.3   | Las teorías sobre el origen de la vida .....                   | - 63 -        |
| 15.4   | Autonomía biológica y origen de la vida.....                   | - 65 -        |
| <b>CONCLUSIÓN.....</b>                                       |  | <b>- 69 -</b> |
| <b>ANEXO.....</b>  |  | <b>- 73 -</b> |
| Infraestructura para la capacidad de evolución abierta ..... |  | - 73 -        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>                                     |  | <b>- 77 -</b> |

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo realizaremos un análisis crítico de la concepción de vida como autonomía. La exposición se estructura en cuatro secciones, que se dividen asimismo en capítulos y estos, en algunos casos, se subdividen en apartados.

La primera sección, *Concepciones de vida*, sirve de marco en el que se encuadra nuestro estudio. Consta de tres capítulos. En el primero resumiremos los planteamientos clásicos sobre el problema de la naturaleza de la vida. En el segundo discutiremos el problema de la definición de vida, a la luz de los trabajos más recientes en este campo. En el capítulo 3, a la vista de las opciones y controversias abiertas en los dos anteriores, veremos qué significa adoptar la concepción de vida como autonomía.

La segunda sección, *La vida como autonomía*, se dedicará a precisar qué entendemos por autonomía biológica y cómo puede este concepto servirnos de guía para una explicación coherente y completa de los fenómenos de la vida. Comprende los capítulos 4 a 7 del trabajo. El capítulo 4 enlaza con el final de la sección anterior – desarrolla lo que supone adoptar el enfoque de la autonomía- y sirve de introducción a la sección que da comienzo –declara los objetivos a desarrollar en ella. En el capítulo 5 analizaremos el concepto de autonomía biológica, apoyándonos para ello en cuatro definiciones de sistema autónomo propuestas desde diferentes marcos teóricos: *la autopoiesis*, *el chemoton*, *el agente autónomo* y *el sistema autónomo básico*. El capítulo 6 lo dedicaremos a distinguir entre la autonomía más simple y la vida. Para ello intentaremos responder a cuestiones tales como: de qué forma se explica la capacidad funcional desde la autonomía; qué es lo que le falta a un sistema autónomo básico para poder ser considerado un ser vivo; cómo permite la autonomía dar cabida a la selección natural en esta concepción de vida; o qué relación hay entre causalidad, autonomía y vida. Partiendo de estos interrogantes, en el capítulo 7 justificaremos la necesidad de naturalizar<sup>1</sup> el concepto de autonomía biológica.

---

<sup>1</sup> La visión naturalista del mundo considera que el mundo es una realidad integrada, que la naturaleza es el principio de todo aquello que es real. Aceptar esta propuesta no supone caer en el reduccionismo epistemológico ni metodológico. El naturalismo no se opone a la emergencia de propiedades, pero sí a su explicación sobrenatural. Utilizaremos el término naturalización para referirnos al proceso por el cuál sustentamos un concepto o una propiedad de alto nivel en las leyes de la naturaleza.

En la sección tercera, *Del mundo físico a la autonomía biológica*, que comprende los capítulos 8 a 12, abordaremos lo requerido en el capítulo 7: integraremos la autonomía, como un fenómeno natural, en un mundo que avanza a la vez hacia el desorden y hacia la organización. Tras una introducción en el capítulo 8, el capítulo 9 trata de física fundamental y de termodinámica y el 10 de química y organización; en ellos analizaremos el aumento de la complejidad, la organización y, a la postre la autonomía, apoyándonos en las ciencias fisicoquímicas y en la ciencia de la complejidad. A la complejidad y la diversidad dedicaremos el capítulo 11. En el 12 justificaremos los componentes del sistema autónomo a partir de lo expuesto en esta sección.

La sección cuarta, *Recapitulación y temas abiertos*, consta de tres capítulos. El capítulo 13 lo dedicaremos a revisar el camino recorrido en nuestro proyecto de naturalización de la autonomía biológica; señalaremos los principales avances conseguidos, pero también los puntos que dejan abiertos campos importantes de investigación. Defendemos que el concepto de autonomía biológica que ha sido analizado en la sección tercera aún deja queda un camino por recorrer; en el capítulo 14 abordaremos este camino al tratar el paso de la autonomía básica a la vida y los problemas que este tránsito deja encima de la mesa. El capítulo 15 –como inevitable consecuencia del propio desarrollo del trabajo acometido- lo dedicaremos al origen de la vida; veremos como la concepción de vida como autonomía expuesta en este trabajo y las investigaciones sobre el origen de lo vivo pueden beneficiarse mutuamente.

Terminaremos con una breve conclusión en la que recogemos algunas consideraciones finales y apuntamos las vías para una profundización de esta investigación en el futuro.

## CONCEPCIONES DE VIDA

### 1. Naturaleza de la vida

Los seres humanos se han preguntado por la naturaleza de la vida desde la antigüedad. ¿En qué se diferencia la vida de la materia inanimada? Esa es la pregunta fundacional del problema que nos ocupa. Otras preguntas surgen de ella (y la complementan) cuando se considera el tema con detalle. ¿Qué tienen en común los seres vivos? ¿Cómo surgió la vida en la Tierra? ¿Qué características de la vida observable hoy en nuestro planeta son esenciales y cuáles son contingentes?

La búsqueda de una definición de la vida está muy presente en la obra de Aristóteles y es también central en el pensamiento de grandes pensadores como Descartes o Kant, y llega también hasta la influyente obra de autores contemporáneos como Schrödinger, Oparin o Mayr<sup>2</sup>. El proyecto de definir lo vivo se extiende, por tanto, desde la antigua Grecia hasta finales del siglo XX. Muchas propuestas clásicas han puesto el foco en las cuestiones conceptuales y fundamentales, y han definido así el marco en el que se dirimen las controversias más recientes. Es por eso por lo que nos interesan ahora.

Encontramos en ellos respuestas diversas a la pregunta de qué diferencia a los seres vivos de la materia inanimada. Para Aristóteles, los seres vivos se distinguen por su capacidad de autoorganizarse y automantenerse; presentan características teleológicas<sup>3</sup>, que no pueden analizarse en función de (reducirse a) su composición y estructura. Descartes sostiene que los organismos no son otra cosa que máquinas complejas. Para él, las características teleológicas de los seres vivos han de

---

<sup>2</sup> Bedau y Cleland (2010) han realizado una interesante recopilación de publicaciones sobre la naturaleza de la vida y los han encuadrado en cuatro partes. La primera la dedican a las discusiones clásicas sobre la vida; la segunda trata del origen y la extensión de la vida; la tercera se dedica a la vida artificial y la biología sintética; y en la cuarta se revisan las definiciones y explicaciones contemporáneas de vida. Las cuatro partes son significativas para dar respuesta a las preguntas enunciadas en el párrafo con el que hemos comenzado. Por el enfoque del presente trabajo, nos interesan principalmente la primera y la última. Nos apoyaremos en las discusiones clásicas en este capítulo y tendremos en cuenta la parte dedicada a las definiciones y explicaciones de vida en el capítulo siguiente.

<sup>3</sup>La teleología hace referencia a la causa final aristotélica; los seres vivos presentan características que parecen tener una finalidad. Mayr (2004) identifica cinco tipos de procesos aparentemente teleológicos: la teleología cósmica –tendencia general hacia el progreso y la perfección-, la adaptación por selección natural, la conducta orientada a fines, los procesos teleomáticos –tendencia hacia un punto final determinado por las condiciones iniciales, bajo el gobierno de las leyes de la naturaleza- y los procesos teleonómicos -deben su desarrollo a un programa. Concluye que la teleología cósmica no existe y que en los otros cuatro no existe la causación retrospectiva.

analizarse utilizando exclusivamente los principios y conceptos de la física. Para Kant, a diferencia de lo que ocurre con los dispositivos mecánicos, un organismo es causa y efecto de sí mismo; y la teleología es la característica fundamental que distingue a los seres vivos de la materia inanimada. Schrödinger sostiene que las características teleológicas de los seres vivos se derivan de su capacidad de mantenerse en un estado de no equilibrio obteniendo energía de su entorno. Para él, la característica distintiva esencial del organismo es su metabolismo<sup>4</sup>. Oparin considera que la complejidad organizativa y la adaptación de la forma a la función son las propiedades esenciales de la vida, y defiende que una y otra pueden explicarse a partir de la química. Para Mayr, determinadas características de la vida, no pueden explicarse en términos de mecanismos fisicoquímicos a nivel molecular; dichas propiedades emergen de los niveles superiores de organización e integración; lo que distingue al ser vivo de lo inanimado es su organización. Otros autores, como Gánti, defienden que los seres vivos son autómatas químicos.

El párrafo anterior contiene las características clave que habrán de tenerse en cuenta al considerar el ser vivo como organismo individual: autoorganización, automantenimiento, teleología, metabolismo. Discute también las diversas posibilidades de concreción del ser vivo individual en el mundo físico, incluyendo un sistema mecánico complejo, un autómata químico y un sistema alejado del equilibrio que obtiene energía del entorno. Y las posibilidades de explicación para el paso de lo inanimado a lo vivo: materialismo, emergentismo, vitalismo.<sup>5</sup>

Por otra parte, desde Darwin los aspectos teleológicos de la vida pueden explicarse por la selección natural. Para algunos la selección natural es el mecanismo esencial para la aparición y el desarrollo de la vida. Otros piensan que la selección natural es imprescindible para el desarrollo de la vida, pero que sólo pudo comenzar a actuar cuando tuvo disponibles colecciones de organismos suficientemente complejos, fruto de otros mecanismos de evolución. Cabe también preguntarse si la evolución natural es necesaria, pero no suficiente, o también si es un mecanismo esencial para la vida,

---

<sup>4</sup> El metabolismo es el conjunto de reacciones químicas que efectúan constantemente las células de los seres vivos con el fin de sintetizar sustancias complejas a partir de otras más simples (anabolismo), o degradar aquellas para obtener estas (catabolismo). Estas reacciones permiten realizar las diversas actividades de las células: crecer, reproducirse, mantener sus estructuras, responder a estímulos, etc.

<sup>5</sup> El vitalismo defiende la necesidad de una fuerza o impulso vital, diferente de las propias de la física, que actuaría sobre la materia inanimada provocando la emergencia de la vida. Los vitalistas coinciden con Aristóteles y Kant en que las propiedades teleológicas de los seres vivos no pueden explicarse a partir de la física. Tras los descubrimientos de la biología de los siglos XIX (selección natural) y XX (bioquímica y biología molecular) el vitalismo quedó fuera el ámbito de la ciencia.

en general, o sólo para explicar la evolución de la vida en la tierra. En todo caso, la vida debe también analizarse como fenómeno colectivo.

## 2. Definición y explicación de vida

La pregunta *¿qué es la vida?* parece conducirnos indiscutiblemente a la búsqueda de una definición. Sin embargo, no todos los estudiosos están de acuerdo con esto. Bedau y Cleland (2010: 295-302) discuten las principales posturas e incluyen en su recopilación los trabajos de quienes las defienden. Así señalan que algunos autores se muestran escépticos sobre la posibilidad real de definir la vida. Citan a Chyba, Sterenly y Griffiths entre quienes coinciden con ellos dos en que una explicación científica satisfactoria de la vida requiere contar previamente con una teoría general de la biología. Pero también hay diferencias entre ellos. Sterenly, Griffiths y Bedau están de acuerdo en que las definiciones provisionales pueden jugar un papel importante en la búsqueda de la citada teoría. Cleland y Chyba (2007) no están de acuerdo con esta afirmación; piensan que cualquier definición de vida estará demasiado ligada a un único modelo, la vida actual en la Tierra. Consideran que la teoría general de la vida debería mejor basarse en una diversidad de criterios tentativos para identificar anomalías e identificar sistemas parecidos a los seres vivos conocidos, pero diferentes de ellos, sobre los que realizar investigaciones más detalladas. Otros autores, más allá de considerar la posibilidad o la oportunidad de la definición, defienden, incluso, que una definición de vida no es un instrumento significativo para el desarrollo científico de la biología.

Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) consideran que, aunque no disponemos de una teoría general de la biología, los avances científicos de las últimas décadas nos han aportado los elementos necesarios para intentar estructurar la teoría que buscamos en torno a algunos conceptos, que hemos de aspirar a que sean fundamentales y universales, aunque hayamos de asumir también que sean provisionales. Con esta premisa, (i) revisan los tipos de definiciones de vida existentes, (ii) fijan las condiciones que habría de satisfacer una buena definición, (iii) analizan dos definiciones que consideran significativas frente a las citadas condiciones<sup>6</sup> y (iv) proponen su propia definición de vida. Nos interesan ahora sus consideraciones del punto (i). Clasifican las definiciones en descriptivas y esencialistas. Las primeras consisten en listas de

---

<sup>6</sup> Analizan (i) la autopoiesis, que se explica el apartado 5.1, y (ii) la definición de trabajo de la NASA: Vida es un sistema químico automantenido capaz de someterse a la evolución darwiniana (Sagan, 1970).

propiedades que habrían de caracterizar la vida y distinguirla del mundo inanimado. Las consideran inadecuadas por la dificultad de seleccionar las propiedades necesarias y suficientes, sin carencias ni redundancias, para completar la definición. Por el contrario, las definiciones esencialistas caracterizan un fenómeno en términos de la organización y la dinámica subyacentes. La definición de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno, que analizaremos posteriormente, es esencialista y es también genealógica, en el sentido de que persigue la explicación del proceso que conduce, paso a paso, desde el mundo inanimado hasta la vida<sup>7</sup>.

### **3. La autonomía como concepción de vida**

En el capítulo 1 hemos visto que los clásicos ponían el foco en cuestiones diversas que suponen la priorización de diversos aspectos del fenómeno de la vida. ¿Es la vida un fenómeno individual o colectivo? ¿Cuáles son las propiedades que caracterizan lo vivo? ¿Cómo se realiza la vida en un mundo inanimado? ¿Cómo puede explicarse el paso de lo inerte a lo vivo?

En el capítulo 2 hemos discutido si la vida es definible y, en su caso, cómo debería hacerse. ¿Es conveniente catalogar características de la vida o buscar su esencia a partir de lo que nos aporta la ciencia? ¿Debemos considerar la vida como un fenómeno dado, como un resultado que podemos analizar; o hemos de comprenderla construyendo las etapas que llevan de la materia inanimada hasta el ser vivo.

Cualquier investigación sobre la naturaleza de la vida habrá de comenzar haciendo elecciones, escogiendo respuestas provisionales a las preguntas planteadas en los párrafos anteriores. El conjunto de presupuestos admitidos cuando se realiza un análisis de la naturaleza de la vida configura la concepción de vida de la que parte ese análisis. La visión que el investigador tiene sobre un fenómeno, sus creencias sobre el mismo, condicionan cómo se acercará a su comprensión, y supone atender prioritariamente algunas cuestiones y posponer o descartar otras.

El objeto de este trabajo es analizar la concepción de vida como autonomía. Consideraremos como encuadrables en esta concepción teorías que compartirán una visión global, aunque también diferirán en aspectos importantes.

Este planteamiento supone (i) dar prioridad a la componente individual de la vida frente a su dimensión colectiva, (ii) elegir la autonomía (fruto de la autoorganización)

---

<sup>7</sup> Cuando tratemos del origen de la vida en el capítulo 15, veremos que una definición genealógica tiene mucho en común con una teoría sobre el origen de la vida.

como la característica principal del ser vivo, (iii) explicar las características teleológicas desde la autonomía.

La vida como autonomía admite diferentes *realizaciones* de sistemas autónomos, sus componentes pueden ser naturales o artificiales. La autonomía también es compatible con diferentes explicaciones del paso de lo inanimado a lo vivo; puede considerarse el sistema autónomo como un ente abstracto y acabado, o analizar la evolución de la complejidad necesaria para la autonomía, teniendo en cuenta condicionantes de todo tipo. El estudio del organismo como sistema autónomo exige un planteamiento sistémico que, por otra parte, es compatible con la vida entendida como mecanismo o como propiedad emergente. Veremos que diferentes teorías desarrolladas a partir del concepto de autonomía reducen el campo de las posibilidades aceptables.

Por último, el estudio de la vida a partir de la autonomía no debería tampoco olvidar, aunque fuera en segundo término, la componente colectiva del fenómeno de la vida.

# LA VIDA COMO AUTONOMÍA

## 4. El enfoque de la autonomía

Poner el foco en el individuo supone dar prioridad a su organización interna. Para algunos la vida es, en primer lugar, organización, oposición al desorden. Desde un enfoque organizacional se analizan entonces características como el metabolismo, la reproducción, la funcionalidad o la capacidad agencial de los seres vivos. Pero, en el mundo inanimado se dan también frecuentes casos de organización. Lo que diferencia al ser vivo de estas organizaciones no biológicas es que el sistema vivo no sólo se autoorganiza, sino que, más allá de ello, se automantiene y se autoproduce. Así pues, la autoorganización en biología es un ingrediente necesario de una característica más fundamental y comprensiva del ser vivo: la autonomía.

Por otra parte, la concepción heredada de la Biología considera el mecanismo de la selección natural como el centro del proceso de aparición y desarrollo de la vida. Desde este mecanismo se explican luego la replicación, la estabilidad y el cambio o la adaptación funcional.

El análisis de la naturaleza de la vida que presento en este trabajo toma el estudio de la autonomía biológica como punto de partida y línea guía, pero deberá acabar dando también respuesta a la capacidad de evolución de los seres que llamaremos vivos; partiendo del mundo prebiótico, cuando la selección natural no tenía aún elementos sobre los que actuar.

Comenzaremos esta sección revisando cuatro acercamientos a la definición de vida que comparten la concepción de autonomía y analizaremos la definición del concepto de autonomía biológica que de ellos se deriva.

En el capítulo 6 abordaremos la definición de vida como autonomía. Para ello, pondremos en relación autonomía, función y agencia; autonomía y capacidad de evolución abierta; y causalidad, autonomía y vida.

En el capítulo 7, último de esta sección, justificaremos la necesidad de explicar cómo surge la autonomía, con *pequeños* pasos que se inician en el mundo inanimado más básico. Esa es la tarea a la que dedicaremos la sección siguiente, *Del mundo físico a la autonomía biológica*.

## 5. El concepto de autonomía y la definición de vida: cuatro enfoques

### 5.1 La autopoiesis de Maturana y Varela

El concepto de autonomía biológica tiene sus precedentes en la cibernética y la ciencia de sistemas de la primera mitad del siglo XX, pero nace propiamente con el concepto de *autopoiesis* de Humberto Maturana y Francisco Varela en los años setenta.

La autonomía supone una oposición a la visión de la vida heredada de la Síntesis Moderna y la biología molecular. Frente a la predominancia de los enfoques que subrayaban el dictado de la selección natural que opera sobre los genes, la propuesta de la autopoiesis (autoproducción) reivindica el individuo, organizado y separado del entorno con el que interactúa. Frente a la comprensión de la vida como un fenómeno que deriva de las propiedades de los ácidos nucleicos y las proteínas, la teoría de la autopoiesis de Maturana y Varela enfatiza la vida como una propiedad inherente del sistema.

El ser vivo es una máquina autopoietica, cuya definición es la siguiente:

Una máquina autopoietica es una máquina organizada como un sistema de procesos de producción de componentes concatenados de tal manera que producen componentes que (i) generan los procesos (relaciones) de producción que los producen a través de sus continuas interacciones y transformaciones, y (ii) constituyen a la máquina como una unidad en el espacio físico (Maturana y Varela, 1973, pág. 67).

El sistema autopoietico se caracteriza por su capacidad de autoorganizarse para regenerarse. La actividad del sistema consiste en la continua regeneración de los procesos y componentes que lo mantienen como la unidad que es. El sistema autopoietico debe construir su propia frontera para poder constituirse como unidad distinguible. La autocatálisis y la membrana son en él dos componentes complementarios. El producto resultante de la acción del sistema es el propio sistema.

Aunque el sistema está en contacto con su entorno e interactúa con él, la dinámica que genera su organización y su acción autoprodutora es interna. El sistema autopoietico cambia como respuesta a estímulos externos a él, pero también como

resultado de cambios internos que compensan los anteriores. Ambas fuentes de transformación están acopladas y son inseparables.

Lo que caracteriza a los sistemas vivos es que son sistemas autoprodutores y autoproducidos. La diversidad que observamos entre ellos, ligada a la reproducción y la evolución, son aspectos secundarios. La reproducción requiere la existencia de una unidad para ser reproducida, y es necesariamente secundaria al establecimiento de tal unidad; la evolución requiere reproducción y la posibilidad de cambio, a través de la reproducción de aquello que evoluciona, y es necesariamente secundaria al establecimiento de la reproducción. (Varela, 1979)

La selección natural no se considera un mecanismo generador de diversidad, sino un proceso de eliminación de los organismos menos adaptables entre los generados por la dinámica autopoietica.

La autopoiesis se propone como forma básica de autonomía, como la característica mínima a compartir por todos los seres vivos. Para Maturana y Varela la autopoiesis ya contiene todo lo necesario para la definición de la vida.

Una unidad autopoietica se concibe como un sistema cerrado operacionalmente sobre sí mismo en el que su acción es su propia reconstrucción. Para el sistema autopoietico su ser es su hacer. Es también un sistema cerrado estructuralmente, en el que la creación y el mantenimiento de su organización interna y de su frontera física (que encapsula al sistema) son inseparables.

La idea de la autopoiesis enlaza con la visión de Kant del organismo vivo como fin y causa de sí mismo y del origen de cada una de sus partes a partir de y en función del resto (Weber y Varela, 2002).

## **5.2 El chemoton de Gánti**

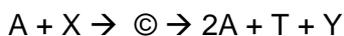
El modelo teórico del *chemoton* de Tibor Gánti (Gánti, 2003) fue desarrollada durante la segunda mitad del siglo XX, aunque sólo a partir de 2003 comenzó a tener difusión fuera de su país de origen, Hungría. El chemoton es un modelo de sistema prebiótico que, en opinión de Gánti, recoge las características dinámicas básicas de los seres vivos.

Su autor lo presenta como el fundamento para una teoría que muestra cómo los procesos químicos pueden organizarse en sistemas dinámicos, desde reacciones simples hasta células vivas.

En su búsqueda del sistema químico más simple que muestre las características propias de la vida, Gánti toma como modelo el ser vivo más sencillo entre los disponibles: la célula. La célula para mantenerse y realizar sus funciones necesita realizar trabajo de modo continuo. Este trabajo se realizará en el citoplasma, que Gánti caracteriza como el motor de la célula. Y el trabajo continuo sólo podrá realizarse por parte de sistemas que realicen una serie de pasos sujetos a constricciones que respeten la organización interna del sistema.

La solución está en los procesos cíclicos y el modelo de sistema prebiótico propuesto por Gánti, el chemoton, expone de manera muy clara la dinámica estructural de estos procesos. Como indica William Bechtel en su examen del chemoton (Bechtel 2007), Gánti ofrece una perspectiva iluminadora sobre la función de los ciclos en bioquímica y les otorga un papel central en la organización de los sistemas vivos. Gánti aborda la definición del chemoton apoyándose en el estudio de los ciclos bioquímicos reales y propone un ciclo metabólico teórico que no sólo regenera sus componentes, sino también la membrana que cierra el sistema.

Su análisis puede simplificarse como:



donde

- $\textcircled{C}$  representa el ciclo
- A son los componentes del ciclo (que aumentan en cada vuelta)
- X son los reactantes e Y los productos
- T es la membrana

Asumiendo que la membrana toma forma esférica, y de acuerdo con el modelo expuesto, su crecimiento será más rápido que el del volumen que ocupan los metabolitos que encierra. Esto favorece la división del sistema en dos esferas cuando se alcanza el tamaño adecuado.

El *supersistema* inicial de Gánti incluía como *subsistemas* el metabolismo y la membrana. El metabolismo garantiza el mantenimiento de los componentes del sistema y su aumento. La membrana permite el control del flujo de materia desde y hacia el exterior, pero también la acumulación de componentes, el crecimiento y la reproducción.

Con los elementos considerados hasta ahora, el sistema podría funcionar en un entorno estable, pero una pequeña variación en las condiciones de contorno podría acabar con él. Para dotar al sistema de una mayor estabilidad habría que añadirle un sistema de control que no dependiese directamente de la estequiometría<sup>8</sup> de las reacciones metabólicas.

En versiones posteriores de su sistema, Gánti añadió un tercer subsistema haciendo que el sistema metabólico añadiese un monómero<sup>9</sup> a un polímero que se va construyendo de acuerdo con una plantilla. Esto dota al sistema de una cierta memoria, al menos del número de ciclos transcurridos. Griesemer y Szathmáry (ver Bechtel, 2007) proporcionaron una solución para la independencia estequiométrica del sistema de control proponiendo que fuesen al menos dos tipos de monómeros distintos los que el metabolismo aportaría a la construcción del polímero. El número de monómeros de cada tipo y su colocación en la cadena constituyen un código binario que puede servir de base a un sistema de control independiente. El código, que controla la evolución del sistema, puede cambiarse sin afectar a las reacciones básicas del mismo; confiere al sistema una propiedad en gran medida independiente de los flujos de materia y energía.

El chemoton de Gánti, en su versión última, está ya dotado de una cierta infraestructura; su organización interna le permite no sólo diferenciarse del entorno y automantenerse en él, sino también regular el efecto del exterior sobre el sistema y la agencialidad de éste sobre aquél.

Pero, como indica Bechtel (2007), el chemoton, presenta aún una carencia importante para poder considerarlo como modelo de un auténtico sistema autónomo. Su construcción no tiene en cuenta que no es sólo materia lo que entra y sale del sistema. La definición de sistema autónomo debe también dar cuenta explícita de la incorporación de energía, su utilización en la producción de trabajo y la expulsión, generalmente en forma de calor, de la energía residual.

---

<sup>8</sup> En química, la estequiometría es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactantes y productos en el transcurso de una reacción química.

<sup>9</sup> Un monómero es una molécula que puede enlazarse químicamente con otras similares para formar una macromolécula conocida como polímero.

### 5.3 El agente autónomo de Kauffman

Stuart Kauffman (2000) analiza el problema de la autonomía biológica desde la perspectiva de la termodinámica y encuentra su solución en los grupos de moléculas *autocatalíticas*<sup>10</sup>.

Un *agente autónomo* (lo que para Kauffman equivale a un ser vivo) es para él un sistema capaz de actuar en su propio interés en un entorno dado. Se trata de un sistema fisicoquímico inmerso en un ambiente caracterizado por los flujos de materia y energía. Tanto la constitución del sistema como su capacidad agencial necesitan de la realización de trabajo. No basta con que la energía fluya a través del sistema, sino que éste debe ser capaz de hacer uso de ella, de llevar a cabo una liberación restringida de energía. Por ello, habrá de tratarse de un sistema abierto alejado del equilibrio.

Como sistema observable en el mundo real que es capaz regenerarse, Kauffman parte de un conjunto de reacciones autocatalíticas. Un agente autónomo será un sistema autocatalítico capaz de reproducirse y llevar a cabo uno o más ciclos de trabajo termodinámico.

A pesar de que cada proceso de catálisis es local, el cierre catalítico, la aparición de la autocatálisis, es una propiedad emergente del sistema global. Un sistema autónomo debe ser capaz de establecer un cierre en lo que Kauffman llama el *espacio de las funciones catalíticas*. Y esto requiere tanto el establecimiento de las funciones catalíticas como la producción de los sustratos específicos que desarrollan tales funciones. El cierre catalítico surge como fruto de la complejidad del sistema de reacciones químicas y su aparición supone un cambio de fase<sup>11</sup> del sistema.

La liberación controlada de energía, (es decir, la realización de trabajo), requiere que el proceso esté sometido a constricciones; pero la creación de constricciones requiere, a su vez, la realización de trabajo. Se establece así una dinámica recursiva entre trabajo y constricciones.

---

<sup>10</sup> La catálisis es el proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación en ella de una sustancia llamada catalizador. Los catalizadores, a diferencia de los reactantes no se modifican durante la reacción química. Se dice que un conjunto de reacciones químicas es autocatalítico si unas reacciones producen los catalizadores que actúan sobre otras de modo que la catálisis del conjunto de reacciones es autosostenible.

<sup>11</sup> Una fase de un sistema es una región del mismo que muestra propiedades uniformes. Una transición o cambio de fase es un cambio, normalmente discontinuo, de las propiedades del sistema.

Es como un círculo virtuoso: el trabajo produce restricciones, aunque se requieren precisamente restricciones a la liberación de energía para generar trabajo (Kauffman, 2000, pág. 21).

Una red de reacciones químicas que desarrolle un cierto ciclo de trabajo habrá de conectar reacciones exergónicas –espontáneas, que generan energía- con reacciones endergónicas –que requieren la aportación de energía del exterior para producirse. Deberá recorrer un ciclo de estados, de forma similar a lo que ocurre el ciclo de Carnot<sup>12</sup>. Para que el ciclo opere a un ritmo finito –es decir, de manera irreversible- el agente autónomo ha de ser un sistema termodinámico abierto impulsado por fuentes externas de materia y energía (es decir, de alimento) y será el flujo continuo de esa aportación la que mantenga al sistema fuera del equilibrio.

Como ejemplo de su propuesta, Kauffman comienza el diseño de un primer agente molecular con dos trímeros (5'CCC3' y 5'GGG3') y un hexámero (3'CCCGGG5')<sup>13</sup>, tales que se da la reacción  $5'CCC3' + 5'GGG3' \leftrightarrow 3'CCCGGG5'$ . Ante el exceso de trímeros frente a la situación de equilibrio, se produce la síntesis exergónica del hexámero.

A continuación, añade al sistema la reacción basada en un pirofosfato que se escinde en dos monofosfatos, abreviado  $PP \rightarrow P + P$ <sup>14</sup>. Como esta reacción es exergónica, sobra energía que se utiliza en la síntesis adicional (ahora endergónica) del hexámero.

---

<sup>12</sup> Sadi Carnot estudió la producción de trabajo por las máquinas térmicas, poniendo de manifiesto que la máquina ideal es la que describe el ciclo que tomó su nombre. Dicha máquina trabaja entre dos focos a diferente temperatura y pasa por cuatro etapas, al final de las cuales se vuelve a encontrar en el estado inicial, quedando lista para comenzar de nuevo. El sistema está formado por un pistón que puede expandirse y contraerse y los mecanismos que permiten (i) el cambio de etapa y (ii) la transmisión del movimiento del pistón para producir energía mecánica. Las etapas sucesivas son (i) absorción isoterma de calor –en contacto con el foco caliente- y expansión del pistón (ii) expansión adiabática –aislado del exterior- mientras disminuye la temperatura hasta alcanzar la del foco frío (iii) compresión isoterma –en contacto con el foco frío- y (iv) compresión adiabática que eleva la temperatura hasta igualar la del foco caliente.

<sup>13</sup> Un trímero es una cadena formada por tres monómeros; un hexámero contiene seis. Cada monómero es una molécula compleja. En la descripción que hace Kauffman de su modelo de agente molecular utiliza una notación simplificada, en la que cada letra corresponde a un monómero y los números hacen referencia a la orientación de las moléculas.

<sup>14</sup> Monofosfatos y Pirofosfatos son moléculas compuestas de varios átomos, entre ellos uno o dos átomos de fósforo (P). La notación simplificada que se emplea en la explicación del agente de Kauffman sólo atiende al número de átomos de fósforo de las moléculas que participan en la reacción, por ser eso lo que interesa a lo que se expone.

Para disponer de energía libre que nos permita seguir realizando la síntesis endergónica, dejamos que un fotón incida sobre nuestro sistema y ayude a la síntesis de PP a partir de P+P.

El sistema  $P \leftrightarrow P + P$  constituye una máquina química. Alimentado por fotones realiza ciclos de trabajo. Es un proceso cíclico; al acabar está listo para empezar.

La interconexión de reacciones exergónicas y endergónicas es la esencia del metabolismo intermedio<sup>15</sup> y de la transducción<sup>16</sup> bioquímica de la energía. La autocatálisis se acopla a las reacciones exergónicas y endergónicas conectadas entre sí.

Este sistema tiene autorreproducción y metabolismo.

El prototipo de agente autónomo diseñado es más eficiente que la sola síntesis exergónica del hexámero a partir de los dos trímeros.

Aunque los sistemas autocatalíticos de Kauffman no definen explícitamente un cierre estructural, es claro que para que el sistema funcione, se requiere que las especies moleculares estén confinadas en un pequeño volumen. Un agente autónomo molecular completo tendría que sintetizar su propio envoltorio.

Hemos de reconocer que, como indican Etxeberría y Moreno,

De manera muy elegante, pues, el planteamiento de Kauffman desarrolla un concepto de autonomía en el que funcionalidad, constricción y trabajo se definen mutuamente (Etxeberría y Moreno, 2007, pág. 29).

Las aportaciones principales de Kauffman vienen de los condicionantes de la termodinámica y las herramientas de la complejidad. El avance más significativo sobre el modelo de Gánti es la consideración de la energía como elemento constituyente del sistema autónomo.

#### **5.4 El sistema autónomo básico de Ruiz-Mirazo y Moreno**

El programa de Ruiz-Mirazo y colaboradores es la realización de un análisis que lleve desde las estructuras fisicoquímicas disipativas al ser vivo. El papel clave en esta

---

<sup>15</sup> El metabolismo intermedio es el conjunto de reacciones químicas implicadas en la transformación de las moléculas de nutrientes para producir bloques utilizados por las células para construir diversas estructuras.

<sup>16</sup> La transducción es la transformación de un tipo de energía en otra de diferente naturaleza.

propuesta lo juega el concepto de *sistema autónomo básico*. En el trabajo de estos autores, las consideraciones materiales y termodinámicas estarán presentes desde el principio. La autonomía básica es para ellos

La capacidad de un sistema de gestionar el flujo de materia y energía a través de él, de modo que el sistema puede, al mismo tiempo, regular, modificar y controlar (i) los procesos autoconstructivos internos y (ii) los procesos de intercambio con el entorno (Ruiz-Mirazo y Moreno, 2004, pág. 240).

Ruiz-Mirazo y Moreno comienzan señalando las diferencias entre las estructuras disipativas<sup>17</sup>, en las que son los flujos de materia y de energía los que mantienen el sistema alejado del equilibrio, y el sistema que consideramos autónomo, que es capaz de generar y mantener también internamente sus propias constricciones. La dinámica interna del sistema debe generar mecanismos de control, tanto globales, –al nivel macroscópico- como locales –a nivel molecular. El origen de la autonomía debe, por lo tanto, buscarse en la química; y, dentro de la química, la solución nos la dan Prigogine y Stengers (1979) con las redes de reacciones autocatalíticas que pueden organizarse en entornos alejados del equilibrio para realizar trabajo y generar sus propios componentes.

La *autocatálisis* no es una condición suficiente para la autonomía, pero sí una condición necesaria. El primer constituyente de los sistemas autónomos básicos serán, por tanto, las redes de reacciones químicas autocatalíticas alejadas del equilibrio.

El segundo elemento de nuestro sistema se hace necesario cuando se quieren resolver problemas como la crisis osmótica<sup>18</sup>. El sistema autónomo debe, según Ruiz-Mirazo y Moreno, contar desde el principio con una *frontera física* que facilite el control tanto de la concentración de componentes en el interior del sistema, como del necesario flujo de materia y energía desde y hacia el exterior. Los sistemas (proto)metabólicos, en su desarrollo hacia mayores niveles de complejidad, deben coevolucionar con las (proto)membranas que los contienen.

---

<sup>17</sup> Se define el concepto de estructura organizativa en una nota a pie de página del apartado 9.2.

<sup>18</sup> La ósmosis es fenómeno que consiste en el movimiento neto espontáneo de moléculas de disolvente a través de una membrana semipermeable que tiende a igualar las concentraciones de soluto en los dos lados. La crisis osmótica es un desequilibrio asociado a una inadecuada diferencia de concentraciones de componentes a un lado y otro de la membrana.

El tercer punto a tener en cuenta es la importancia de los *procesos energéticos*. La generación de constricciones y la realización de trabajo, como indicaba Kauffman, están interrelacionadas formando ciclos. Pero trabajo y constricciones no pueden darse sin la aportación de energía. La construcción y el mantenimiento del sistema requerirán la utilización de energía para la realización de trabajo y, como los procesos autoconstructivos se basan, a menudo, en procesos endergónicos, la solución obligada será, tanto para Ruiz-Mirazo y Moreno como para Kauffman, el acoplamiento de procesos exergónicos y endergónicos.

El acoplamiento de procesos exergónicos y endergónicos requiere transferencia de energía entre ellos, y ésta transferencia, para ser eficiente, precisa algún tipo de componente que haga de intermediario. Por otra parte, el mantenimiento de la compleja red de procesos acoplados requiere algún sistema de distribución de la energía captada del exterior sistema. Resolver este problema de forma general requiere al menos dos tipos de *monedas* de energía de uso general en el sistema, una ligada a los procesos de acoplamiento y otra a los procesos de transporte. Los dos tipos de monedas de energía interconvertibles serán una química y otra quimiosmótica<sup>19</sup>.

La relación entre los tres ingredientes del sistema autónomo es completa. Ya hemos citado la dependencia entre autocatálisis y energía. También que la autocatálisis contribuye a la formación de la membrana y ésta favorece que aquella pueda llevarse a cabo. Por último, las reacciones químicas y los procesos de transporte se acoplan a través de la membrana.

Los tres ingredientes del sistema autónomo básico –catalizadores, membrana y monedas de energía- son necesarios para la dinámica creadora de relaciones funcionales dentro del sistema y de capacidades agenciales del sistema sobre su entorno. Los tres ingredientes son fuertemente interdependientes y debieron desarrollarse conjuntamente a partir de sistemas químicos alejados del equilibrio.

## 5.5 La autonomía: recapitulación

Las cuatro propuestas de sistemas autónomos que aquí analizamos comparten dos importantes características, de las que el sistema de Maturana y Varela es precursor. Primero de todo, ponen el foco en el aspecto individual de la explicación de la vida

---

<sup>19</sup> La quimiosmosis es la difusión de iones a través de una membrana. En concreto, la difusión de protones (iones de átomos de hidrógeno) a través de la membrana celular, debida a un gradiente de concentración electroquímico, sirve de base para la creación de ATP, la molécula que transporta energía en el interior de la célula.

(organismo o sistema) frente al dominio de los evolucionistas, que analizaban la vida sólo como una característica propia de las poblaciones regidas por la selección natural. En consecuencia, centran su explicación de la complejidad de los seres vivos y en su autonomía biológica.

En segundo lugar, los cuatro acercamientos al problema de la autonomía (y de la vida) son enfoques sistémicos. La autonomía y la vida solo pueden estudiarse teniendo en cuenta el sistema global, no pueden encontrarse en ninguna de las partes que lo componen. Vida y autonomía son en los cuatro casos propiedades emergentes que surgen del conjunto autoorganizado.

En un sentido amplio, todas las teorías en consideración son autopoieticas o, mejor, defensoras del papel de la autonomía en la definición de la vida. Pueden identificarse, no obstante, diferencias significativas entre ellas.

Como recuerda Luigi Luisi (2013), la autopoiesis de Maturana y Varela es una teoría fenomenológica:

La principal característica de la autopoiesis es su enfoque fenomenológico, basada en la observación de la vida celular. Es decir, no empezamos a discutir la vida en el marco de la teoría de la información o la entropía negativa, o cualquier otro constructo teórico a priori, sino que la fenomenología significa aquí que se observa un simple microorganismo tal y como es, y se deduce de esta observación lo esencial para la vida...(Luisi, 2013, pág. 18).

Por el contrario, las otras tres propuestas persiguen la definición (construcción) de sus sistemas o agentes autónomos manteniendo la consistencia con (apoyándose en) otras ciencias más básicas: todos presuponen los condicionantes de la química, Kauffman y Ruiz-Mirazo y Moreno dan un papel decisivo a la termodinámica y Gánti, por su parte, incorpora el uso de información<sup>20</sup>.

Ruiz-Mirazo y Moreno (2004), critican la autopoiesis por ser una definición excesivamente abstracta, que no tiene en cuenta los requerimientos energéticos y materiales del mundo físico, que habrán de condicionar de modo determinante los sistemas autónomos reales. Kauffman, Gánti y, más aún, Ruiz-Mirazo y Moreno pretenden soluciones más concretas y condicionadas por el mundo en el que se dan los sistemas que estudian.

---

<sup>20</sup> Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno incluirán la gestión de información cuando pasen del sistema autónomo básico al ser vivo, como veremos en el apartado 6.2.

Maturana y Varela definen la autopoiesis como una propiedad acabada de los seres vivos, identificable por la presencia de las características de construcción y mantenimiento de una unidad distinguible. Los otros autores, y muy especialmente Ruiz-Mirazo y Moreno, abordan una construcción ascendente, intentando identificar los componentes y procesos mínimos que permitan la aparición del sistema autónomo. De este modo, indagan a la vez en la naturaleza de la vida y en su origen.

Al definir su sistema autónomo básico, Ruiz- Mirazo y Moreno coincide con Kauffman en los criterios a tener en cuenta: la elección de un conjunto de reacciones autocatalíticas como primer constituyente del sistema; la importancia otorgada desde el principio a la termodinámica y, en especial, al ciclo trabajo-restricciones; la necesidad del acoplamiento de procesos exergónicos y endergónicos y la concurrencia de procesos constitutivos e interactivos, interrelacionados, que trabajarán a diferentes escalas temporales en la construcción y mantenimiento del sistema.

Pero, como señalan Ruiz-Mirazo y Moreno

... hay una parte importante del trabajo que Kauffman deja inconclusa: determinar la cantidad y el tipo de constricciones (y los procesos de conversión de trabajo asociados) que se requieren para lograr la autonomía mínima (Ruiz-Mirazo y Moreno, 2011, pág. 30).

El objetivo no atendido por Kauffman y sí abordado por estos autores, lo que hace distinta su propuesta, es la adición de condiciones necesarias y suficientes para la aparición del sistema autónomo básico.

La autopoiesis, el sistema autónomo básico y el chemoton incluyen explícitamente la membrana como parte inseparable del sistema desde su primera definición. También el agente de Kauffman concluye la necesidad de una membrana.

De las cuatro propuestas analizadas, sólo el chemoton apunta un inicio de solución para el almacenamiento y la gestión de la información. Ruiz-Mirazo y Moreno son conscientes de esta carencia, si no para la definición de autonomía básica si para la caracterización de la vida, y reservan la solución para sistemas autónomos cualitativamente diferentes del más básico, a los que nos referiremos en el siguiente capítulo.

## 6. Autonomía y vida

### 6.1 Autonomía, función y agencia

Recapitulemos algunas de las afirmaciones realizadas en párrafos anteriores y que conforman el concepto de autonomía. Un sistema autopoietico produce sus propios componentes de modo que regeneran y realizan la red que los produce, y constituyen el sistema como una unidad distinguible en el dominio en el que existe. El agente autónomo de Kauffman es un sistema capaz de actuar en su propio interés en un entorno dado. La autonomía básica de Ruiz-Mirazo y Moreno supone que un sistema abierto en un entorno alejado del equilibrio sistema puede, al mismo tiempo, regular, modificar y controlar los procesos autoconstructivos internos y los procesos de intercambio con el entorno.

Como indican Etxeberría y Moreno (2007), refiriéndose tanto la autopoiesis como al agente autónomo de Kauffman:

... el sistema se constituye como una serie de procesos... causalmente encadenados... lo cual determina la repetición indefinida de un bucle. Aunque ese bucle puede (y debe) implicar variaciones, lo esencial es la existencia de un determinado patrón, que se mantiene a lo largo de los ciclos de autoproducción y que constituye la "identidad" del sistema (Etxeberría y Moreno, 2007, pág. 29).

Esta afirmación puede aplicarse también al chemoton y al sistema autónomo básico; es una característica de la autonomía. Pero es fácil encontrar sistemas que cumplen con las citadas definiciones y no pasan de ser sistemas triviales. Los ejemplos más habitualmente citados son los huracanes, las llamas de velas, los remolinos de agua o las células de Bénard<sup>21</sup>. Si queremos comprender la vida necesitamos avanzar más allá de la autonomía básica.

---

<sup>21</sup> Henri Bénard estudió en 1900 las estructuras hexagonales que se forman en una capa horizontal fina de determinados fluidos aceitosos cuando se supera un gradiente crítico de temperaturas entre sus parte inferior y superior. Se comienza calentando la parte inferior del líquido, aumentando continuamente la diferencia de temperatura entre las dos partes. El comportamiento del sistema presenta dos fases diferentes. (i) Al principio el calor asciende por conducción: el caos molecular, mayor en el fondo caliente, se va extendiendo hacia arriba, transmitido por los choques moleculares, sin suponer un desplazamiento macroscópico del fluido. El sistema se muestra homogéneo. (ii) Cuando el gradiente de temperaturas alcanza un umbral crítico, la conducción da paso a la convección, el calor se transmite gracias al movimiento del fluido, y se forman células hexagonales, observables a simple vista, que se ajustan a un patrón regular. El líquido caliente asciende por el centro de la célula y el frío desciende por el exterior. La formación de estas células es un fenómeno de autoorganización global debido a interacciones locales no lineales. Volveremos sobre este tema más adelante.

Como explica Mark Bickhard (2000), las contribuciones del sistema a su automantenimiento son funcionales para ese sistema, y los componentes y las partes del sistema que sirven (que tienen la disposición de servir) a esa contribución cumplen funciones. El paso de sistemas autoorganizados simples, que dependen en gran medida del exterior, a sistemas automantenidos, crecientemente autónomos, conlleva una estructura interna más compleja, una identificación de partes que asumen funciones diferenciadas, siempre supeditadas al automantenimiento del sistema, a su autonomía frente al entorno.

Autonomía no supone aislamiento, sino capacidad de interacción. Como justifican Etxeberría y Moreno en el artículo citado, la identidad que un sistema autónomo autoconstruye es una identidad con capacidad agencial. Por ello, el sistema debe compaginar una organización interna estable y la realización de procesos sobre el exterior del mismo. Esto requiere la presencia de dos tipos de procesos sustancialmente diferentes y a los que corresponden escalas temporales distintas. Por una parte, son necesarios los procesos “constitutivos” que organizan y delimitan el sistema; por otra, a escala temporal más amplia, se necesitan procesos “interactivos” que corresponden a la interacción con el exterior y que también contribuyen a la configuración de la identidad del sistema.

Ruiz-Mirazo y Moreno (2011) también analizan la aparición de las capacidades funcionales y agenciales en el sistema. El paso de la autoorganización a la autoconstrucción requiere la aparición de partes en el interior del sistema y el establecimiento de relaciones entre las partes y entre cada una de ellas y el sistema global. Cada parte del sistema contribuirá a su manera al mantenimiento global; cada parte será funcional si cumple con la norma de contribuir a la autonomía del sistema.

Consideremos ahora la agencia. El sistema autónomo se caracteriza por construir la mayor parte de las constricciones a las que él mismo está sometido. Esto es inseparable de su interacción con el entorno cambiante y alejado del equilibrio. Entre el entorno y el sistema se establece una relación asimétrica en la que tiene origen la capacidad agencial de éste. El sistema autónomo necesita actuar sobre el exterior para automantenerse. La interacción sistema-entorno son causa y efecto inseparables de la constitución del sistema.

Funcionalidad y capacidad agencial, tal y como se derivan de la concepción de la vida como autonomía, son propiedades estrechamente relacionadas. Una mayor capacidad

de interacción con el exterior presupone una capacidad de análisis de los cambios en el entorno y una posibilidad de regulación y modificación de los procesos internos. Y la mayor complejidad de los procesos conlleva un reparto de funciones entre los componentes del sistema.

No sólo puede acometerse la explicación de la funcionalidad y la agencia a partir de la definición de sistema autónomo, también puede definirse la autonomía desde la naturalización de los conceptos de función y de agencia.

Funcionalidad y agencia se presentan así como la capacidad del sistema de modificarse a sí mismo para dar respuesta a situaciones cambiantes; son la otra cara de la infraestructura que favorece las estrategias de automantenimiento. Todas ellas son requerimientos y manifestaciones de la autonomía.

## **6.2 De la autonomía básica al ser vivo**

Desde el punto de vista de Maturana y Varela, un sistema autopoietico tiene ya todas las características propias de un ser vivo, del más simple posible entre ellos. Su sistema puede reproducirse y generar diversidad. Cualquier aumento de complejidad estructural y organizativa, todos los cambios necesarios para pasar de un sistema autopoietico a una célula actual, estarían ya implícitos en la definición de su sistema, no aportarían nada sustancialmente distinto, no dejarían de ser más de lo mismo. De no aceptar este planteamiento la solución habría que buscarla fuera de la definición de autopoiesis. Aunque posiblemente como complemento a la misma.

Kauffman defiende que su agente autónomo es ya un ser vivo. Su ejemplo de agente molecular, que hemos comentado, incluye ya un mecanismo amortiguador de los efectos debidos a cambios en el entorno; por medio del almacenamiento y la liberación de energía puede cambiar el ritmo de síntesis del hexámero. Pero suponer que entre este modelo de agente y un ser vivo actual no se requieren saltos cualitativos es colocarse en una posición similar a la de Maturana y Varela. La solución a este problema, con el planteamiento de Kauffman, podría buscarse en nuevos cambios de fase, que dan lugar a nuevas propiedades emergentes, derivadas del aumento de la complejidad<sup>22</sup>.

Gánti, en su búsqueda del sistema químico más sencillo con las características de un ser vivo, comienza proponiendo un supersistema que incluye membrana y

---

<sup>22</sup> Hemos visto que Kauffman plantea el cierre de las funciones catalíticas como un cambio de fase.

metabolismo. Posteriormente, bajo la influencia de lo descubierto por la genética molecular en los seres vivos actuales, añade un tercer subsistema que le permite regular el efecto del entorno sobre el sistema y que independiza metabolismo e información. Pero tampoco el chemoton da respuesta a la complejidad que hoy se observa incluso en los seres vivos más simples.

Por su parte, Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) hacen notar que un sistema autónomo básico, para llegar al ser vivo más simple observable –la célula- se encontrará, al menos, con dos cuellos de botella, cuya superación requerirá cambios cualitativos importantes en la organización, los componentes y la dinámica del sistema.

El primer problema que se presenta es la necesidad de contar un mecanismo que permita la transmisión fiable a la descendencia de los componentes y procesos que van apareciendo, y que cada vez, cubren unas mayores capacidades funcionales y agenciales del sistema. Un mecanismo que proporcione el paso de la reproducción (ya presente en todos los sistema autónomos que hemos mencionado) a la replicación. La solución ha de estar en la generación de componentes que sirvan de plantilla para facilitar la copia, la replicación fiable, de estructuras que dan soporte a funcionalidades complejas. Estos componentes se constituirían así en registros (historia congelada) en base a los cuales se podría hablar ya de herencia. El sistema debe contar con un tipo de polímero en el que se almacene *información* de cómo *deben ser* sus descendientes. Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) llaman al sistema resultante *sistema autónomo hereditario*. El modelo al que llegamos es comparable con el propuesto para el *mundo-ARN*<sup>23</sup>, aunque el camino para llegar a él haya sido bien diferente.

El segundo cuello de botella aparece cuando se tiene en cuenta el crecimiento creciente de la complejidad. El sistema afronta dos objetivos contradictorios. Por una parte, la creciente complejidad y diversidad de procesos necesarios para ir pasando de un sistema autónomo básico hasta una célula requiere catalizadores cada vez más flexibles y versátiles, una gran variedad de formas tridimensionales, muy sensibles a los cambios en su constitución o ensamblado. Por otra, la transmisión de una

---

<sup>23</sup> El mundo-ARN: como veremos en el capítulo 15, las teorías sobre el origen de la vida en la Tierra se han dividido habitualmente entre las que defienden que primero surgió el metabolismo y las que sostienen que primero fue la replicación. El descubrimiento de las propiedades catalíticas de algunas formas de ARN (anteriormente sólo ligado a la replicación) condujo a la hipótesis de que la vida comenzó con moléculas de ARN capaces de autorreplicarse y de realizar procesos catalíticos.

información más compleja precisa el uso de cadenas lineales, estables, uniformes, que aseguren la copia fiable. Para conjugar estos dos objetivos, el sistema no tiene otra salida que dotarse de dos tipos de polímeros distintos, cada uno de ellos especializado en una de las dos tareas que dan lugar a la contradicción. Este nuevo esquema permite el desacoplamiento entre el metabolismo y la replicación. Pero registros y metabolismo deben estar interrelacionados causalmente de forma circular, como, por otra parte, se observa en todos los seres vivos actuales entre las proteínas y los ácidos nucleicos<sup>24</sup>. La relación que permite pasar de un tipo de polímero a otro constituye un código. El desacoplamiento entre el metabolismo y la replicación se corresponde con el que se da entre fenotipo y genotipo.

El sistema autónomo que cuenta con todos los componentes y mecanismos descritos puede ya participar en el proceso de la selección natural y ser considerado un auténtico ser vivo.

Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno definen

*Un ser vivo es un sistema autónomo con capacidad de evolución abierta.* (Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno, 2004, pág. 330).

La definición de sistema autónomo de estos autores es la que hemos expuesto en el apartado 5.4. Por otra parte, por *capacidad de evolución abierta*, entienden

El potencial de un sistema de reproducir su dinámica funcional-constitutiva básica, provocando una variedad ilimitada de sistemas equivalentes, de formas de expresar esa dinámica, que no están sujetos a ningún límite superior de complejidad organizacional predeterminado (aunque están, ciertamente, sujetos a las restricciones energético-materiales impuestas por un medio ambiente finito y por las leyes fisicoquímicas universales (Ibíd., págs. 330-331).

Y este sistema debe tener

Una frontera semipermeable activa (es decir, una membrana), un aparato de transducción/conversión de energía (un conjunto de monedas de energía) y, al menos, dos tipos de componentes macromoleculares interdependientes: unos que lleven a cabo y coordinen directamente los procesos de autoconstrucción (catálisis) y otros que almacenen y transmitan la información relevante para

---

<sup>24</sup> En un anexo se explica la infraestructura que proporciona a los seres vivos actuales de la Tierra su capacidad de evolución abierta.

llevar a cabo eficientemente esos procesos en el curso de las generaciones subsiguientes (registros) (Ibíd., pág. 337).

### 6.3 Autonomía, evolución y vida

Aunque, como los otros autores aquí comentados, ponen el foco en el individuo, organizado y separado de su entorno con el que interactúa, y centran el problema de la vida en la autonomía, Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno dan también respuesta expresa a los planteamientos de quienes defienden el papel de la evolución en el desarrollo de la vida. Un ser vivo para estos autores, para ser aceptado como tal, debe presentar una capacidad de evolución abierta. Aun partiendo del sistema autónomo individual, la resolución de los cuellos de botella que se le presentan al sistema autónomo básico conducen a un sistema que aúna una autonomía más completa con una interdependencia mayor, tanto sincrónica como diacrónica, con otros sistemas similares (población). El sistema ha adquirido unos elementos (componentes y procesos) que le permiten participar en el proceso de selección natural.

Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) establecen grandes pasos en el camino hacia la vida: (i) sistema autoorganizado, (ii) sistema autónomo simple, (iii) sistema autónomo hereditario (un polímero), (iv) sistema con capacidad de evolución abierta (dos polímeros y un código, desacoplamiento entre genotipo y fenotipo). Con este esquema, la evolución darwiniana habría aparecido en el tercer escalón (tipo mundo-ARN) y habría adquirido toda su potencialidad en el cuarto<sup>25</sup>.

En qué punto debemos fijar el comienzo de la vida es una cuestión a convenir. Siguiendo con el modelo de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno, si exigimos a la definición vida unos requerimientos similares a los satisfechos por la vida actual de nuestro planeta, necesitamos como ellos llegar al final del camino y definir el ser vivo como un sistema autónomo con capacidad de evolución abierta. Si sólo exigimos que el sistema vivo pueda comenzar a participar en un proceso de evolución que incluya información almacenada a transmitir a los descendientes, habremos de poner la raya en los sistemas autónomos hereditarios. Pero hemos de notar que en uno y otro caso hablamos de sistemas (y de definiciones de vida) cualitativamente distintos, nos referimos a dos *tipos de vida* diferentes. Con la primera opción los sistemas del

---

<sup>25</sup> Hay que dejar claro que los sistemas prebióticos, aunque no pueden participar en la selección natural, en todo momento se ven sometidos a presiones selectivas. Incluso antes de llegar al sistema autónomo básico los sistemas tienen que autoorganizarse y automantenerse y sólo prosperan aquellos que encuentran soluciones adecuadas para un entorno cambiante. Los mecanismos selectivos y los organismos sobre los que actúan en cada instante están relacionados, se ajustan mutuamente, podemos decir que coevolucionan.

mundo-ARN aun serían prebióticos y con la segunda ya serían seres vivos. Cabría incluso marcar el origen de la vida en la autopoiesis y dejar fuera del concepto vida, como cuestión de grado, los pasos que conducen desde el sistema autónomo básico a los seres vivos actuales. La exigencia de la definición de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno parece la más operativa, teniendo en cuenta que (i) todos los seres vivos conocidos pueden catalogarse como sistemas autónomos con capacidad de evolución abierta (ii) llegar a este escalón requiere un salto cualitativo más allá del resto de sistemas autónomos conocidos o imaginados y (iii) aunque hayamos partido de la autonomía del sistema individual, la solución final da también cabida al enfoque evolucionista en el que la vida no puede separarse de su dimensión colectiva en la que cada individuo es un elemento que participa en el juego de la selección natural.

#### **6.4 Causalidad, autonomía y vida**

En esta sección hemos venido analizado las respuestas que da la concepción de vida como autonomía a las preguntas clásicas sobre la naturaleza de la vida. Conviene volver ahora a la afirmación de Kant, convertida en pregunta: ¿en qué medida es el ser vivo causa y efecto de sí mismo?

De las cuatro causas de Aristóteles, hemos considerado brevemente la causa final en el apartado 6.1. Con lo allí expuesto, habremos de considerar que el avance hacia la autonomía se corresponde con el avance hacia el cierre del sistema bajo causa final. Al final de este capítulo veremos que la capacidad de evolución abierta supondrá la ruptura de este cierre.

Sigamos con la causa material. Con Kauffman y el sistema autónomo básico hemos visto –y profundizaremos en su justificación en la sección *Del mundo físico a la autonomía biológica*– que el aumento de la complejidad que requiere la vida sólo puede darse en sistemas abiertos que intercambian energía y materia con el exterior. La aportación externa de energía y materia es una condición necesaria para la autonomía. El sistema autónomo, considerado globalmente, ha de ser un sistema abierto bajo causa material.

Consideremos en tercer lugar la causa eficiente. El aumento de la complejidad hacia la autonomía ha seguido etapas que hemos nombrado con términos que comenzaban con el prefijo *auto*, que remite al propio sistema. Desde la concepción que estamos analizando, asociamos vida con dominio del sistema sobre la producción y el mantenimiento de sí mismo. La clave puede estar en la causa eficiente. Esto nos acerca a otra definición de vida:

Un sistema material es un organismo si y sólo si es un sistema cerrado bajo causa eficiente (Rosen, 1991, pág. 244).

Veamos por último la causa formal. Los pasos finales que permiten a la concepción de vida como autonomía integrar también los aspectos colectivos son los siguientes: (i) el ser vivo individual cuenta con la infraestructura que le permite participar en la selección natural, (ii) el conjunto de organismos vivos en un mismo momento *están sometidos a* dicho mecanismo, y (iii) la selección natural *diseña* los organismos futuros. El punto (iii) supone la ruptura del cierre cajo causa formal, al menos por lo que afecta al sistema autónomo individual.

Confirmaremos ahora las conclusiones anteriores con un análisis de los componentes fundamentales del ser vivo. Hemos dicho al final del apartado 6.2 que el sistema autónomo con capacidad de evolución abierta incluye dos tipos de componentes macromoleculares interdependientes: unos que llevan a cabo y coordinan directamente los procesos de autoconstrucción, y otros que almacenan y transmiten la información relevante para llevar a cabo eficientemente esos procesos en el curso de las generaciones subsiguientes. En los seres vivos actuales de la Tierra estos requerimientos de concretan en las proteínas y los ácidos nucleicos<sup>26</sup>.

Moreno (2007) analiza la causalidad en proteínas y ácidos nucleicos. Para las primeras concluye que (i) su causa eficiente son determinadas proteínas y el ARN de transferencia, (ii) su causa material son los aminoácidos, y (iii) su causa formal son las moléculas de ADN. Para los ácidos nucleicos cabe un planteamiento análogo, salvo en lo que afecta a su causa formal. ¿Cómo se fija el orden de los nucleótidos en la cadena de ADN? La respuesta está en el proceso de selección natural. Con las palabras del autor citado,

El ADN representa una conexión material entre los niveles evolutivo y orgánico, la dimensión colectiva/histórica y la organización individual. ... el ADN *se escapa* en un cierto sentido del cierre causal que caracteriza la organización individual de los seres vivos (Moreno, 2007, pág.245).

Por tanto, la causa material de las proteínas y los ácidos nucleicos está en los aminoácidos y los nucleótidos de los que están compuestos; pero si preguntamos por la causa material de dichos componentes, acabaremos concluyendo que el sistema se

---

<sup>26</sup> En un anexo se explican los conceptos que se utilizan en este apartado –proteína, ácido nucleico, aminoácido y nucleótido- y el papel que juegan en el mantenimiento y reproducción de la célula.

alimenta del exterior. Esto confirma que el ser vivo es un sistema abierto bajo causa material. Por otra parte, el papel que juegan las proteínas con relación a sí mismas y a los ácidos nucleicos confirma el cierre del sistema bajo causa eficiente<sup>27</sup>. Por último, la ruptura del cierre causal en el caso del ADN, es la explicación al porqué el ser vivo es un sistema abierto bajo causa formal.

En la definición de vida como autonomía, el mecanismo de registro y gestión de información es el principal cambio cualitativo. Sirve de base para integrar en la concepción de vida como autonomía la visión de vida como proceso poblacional. Aunque esto suponga que, a partir de un umbral de complejidad, el aumento de autonomía del individuo sólo se consigue con la cesión de autonomía a la población. Y con ello, las capacidades funcionales y agenciales del organismo también pasan a supeditarse en parte a la supervivencia de la población; se rompe el cierre bajo causa final.

El ser vivo sería, pues, un sistema (i) abierto bajo causas material, formal y final, y (ii) cerrado bajo causa eficiente. Con estas consideraciones se refuerza el poder explicativo de la propuesta de Rosen<sup>28</sup> y se relaciona con la definición de vida como autonomía.

## **7. Naturalización del concepto de autonomía biológica**

El concepto de autonomía biológica desarrollado a partir de la autopoiesis de Maturana y Varela ha mostrado una gran potencialidad para la definición de la vida. A partir de él pueden abordarse los problemas específicos que presentan los seres vivos cuando se contrastan con el mundo inanimado propio de las ciencias fisicoquímicas. No sólo permite abordar directamente los aspectos más centrados en el organismo; también proporciona la base necesaria para acometer a la postre los problemas propios de la componente colectiva de la vida y resumidos en el proceso de la selección natural.

Las propuestas que hemos presentado incluyen, entre todos, los elementos necesarios para definir la autonomía biológica y la vida, a partir ella.

---

<sup>27</sup> El cierre en el espacio de las funciones catalíticas de Kauffman es el sustrato químico del cierre del sistema bajo causa eficiente.

<sup>28</sup> El cierre bajo causa eficiente está condicionado por la apertura del sistema bajo las otras tres causas. Eso supone que, en los seres vivos actuales, la acción de las proteínas como constructoras del organismo no se mantiene invariable, sino que degenera por factores diversos. El ser vivo no consigue mantener eternamente su cierre.

Los trabajos citados de Ruiz-Mirazo y Moreno (2004) y de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) resumen una sólida elaboración de este programa. Concilian la visión fenomenológica y de alto nivel de Maturana y Varela con la atención al hecho de que la vida aparece en el mundo fisicoquímico. Las definiciones de autonomía y de vida han de estar supeditadas a la física y la química, muy especialmente a la termodinámica. Ello no implica que no sean necesarias herramientas adicionales, ajenas a estas ciencias, para formular el concepto de vida (y para construir una ciencia de la biología).

En la exposición de los autores citados, encontramos una propuesta coherente sobre los componentes del sistema autónomo –autocatálisis, energía y membrana- y los procesos que los relacionan; unos y otros deben coevolucionar en sistemas abiertos alejados del equilibrio a partir de sistemas mucho más simples. Y luego habrán de superar cuellos de botella evolutivos para que la autonomía básica dé lugar a la aparición del ser vivo.

Partimos de que el mundo es una realidad integrada y, por tanto, una definición de vida ha de encontrar sus raíces en el mundo físico más básico. Pero entre el mundo que explica la física y el sistema autónomo básico hay tanta distancia que han de encontrarse escalones, pasos de un nivel de complejidad a otro, cambios de fase que tiendan puentes entre uno y otro extremo. Se trata de naturalizar el fenómeno que llamamos vida.

En la siguiente sección proyectaremos los principales fotogramas que retratan los estados intermedios que nos conducen desde el big bang al sistema autónomo. Repasaremos también las herramientas que pueden ayudarnos a comprender qué aporta de nuevo cada corte analizado y como puede estudiarse el paso de uno a otro.

# DEL MUNDO FÍSICO A LA AUTONOMÍA BIOLÓGICA

## 8. Introducción

Si consideramos que el estudio de la autonomía biológica es la estrategia adecuada para la comprensión de la vida, se hace necesario fijar etapas intermedias, encontrar eslabones que unan el mundo físico más básico con la complejidad del sistema autónomo más simple. Los párrafos que siguen son una contribución a esa tarea.

En el capítulo 9 revisaremos la explicación del mundo físico que hace la ciencia actual. De ella sacaremos varias enseñanzas. Recordaremos primero las leyes fundamentales de la naturaleza. Nuestra definición de sistema autónomo habrá de tomarlas como condiciones de partida; lo que buscamos es una definición para la vida (y antes para la autonomía biológica) que se realiza en el mundo real, no al margen de él. En segundo término, reconoceremos los primeros pasos en la formación de estructuras complejas a partir de componentes sencillos; pasos que somos capaces de explicar con las teorías de la ciencia básica. Por último, reconoceremos conceptos que ya aparecen en el mundo físico más elemental y que serán de aplicación para la comprensión de los sucesivos peldaños a superar para pasar de la simplicidad de las partículas elementales a la complejidad del sistema autónomo.

El capítulo 10 se dedicará a analizar los pasos que conducen desde los átomos individuales a los sistemas químicos que alcanzan la autonomía. Sin olvidar los condicionantes ya analizados en el capítulo anterior, especialmente los termodinámicos, añadiremos las aportaciones de la química y de la organización de sistemas; unos y otras nos acercarán a un entendimiento natural del autoensamblaje, la autoorganización y el automantenimiento.

En el capítulo 11 analizaremos las aportaciones a nuestra tarea de la ciencia de la complejidad. Esta reflexión se sitúa un poco al margen de la línea argumental que va de las partículas elementales a las estructuras químicas complejas automantenidas, pero constituye un soporte imprescindible del análisis que realizamos. Justificaremos la aparición de la complejidad y la diversidad, y veremos cómo diversidad y complejidad contribuyen al aumento de la autoorganización y la autonomía.

Se culmina esta sección, analizando en el capítulo 12 los componentes mínimos que debe tener un sistema autónomo, de acuerdo con el análisis realizado. Hablaremos de la autocatálisis, la membrana y la energía.

## 9. Condicionantes del mundo físico

### 9.1 Física fundamental y cosmología

La explicación científica del mundo físico se apoya hoy sobre dos cimientos que proponen visiones que pueden parecer contradictorias pero que son, sin duda, complementarias: la física y la cosmología. Juntas proporcionan la base de una explicación del mundo físico que atiende a las dos preguntas esenciales: su naturaleza (cómo es hoy, al menos cómo funciona, cómo lo observamos) y su origen (cómo ha llegado a ser como es).

Como fundamento del que derivarán todas las explicaciones tenemos cuatro fuerzas – nucleares fuerte y débil, electromagnética y gravitatoria- y dos teorías para describirlas: la mecánica cuántica y la relatividad general. Lo que se presenta es un mundo ideal que, en lo sustancial, no cambia.

Por su parte, la cosmología aporta un relato en el que prima lo histórico, un universo en cambio y evolución desde hace 13.800 millones de años. La cosmología del big bang tiene su origen en la evidencia experimental de un universo en expansión, que nos retrotrae a un instante inicial, y se basa en las dos teorías ya citadas –la mecánica cuántica y la relatividad general- y un principio adicional, el principio cosmológico, según el cual, a grandes escalas, el universo debería ser igual en cualquier punto. La única cuestión que queda fuera de la teoría es el origen del universo. Una vez que aparece el universo, la cosmología actual da cuenta de su expansión, la radiación de fondo de microondas, la edad aparente del universo, el desarrollo de su estructura a través del colapso gravitacional y, lo que aquí nos interesa más, la aparición y la abundancia de los distintos elementos químicos.

Steven Weinberg (1977) describe los cambios en la composición del universo desde un instante después del big bang hasta la formación de los primeros núcleos estables, según transcurre el tiempo y el universo se expande, y la temperatura y la densidad de energía disminuyen. El relato de Weinberg nos permitirá darnos cuenta de que en el mundo de la física más básica aparecen ya fenómenos y conceptos que serán imprescindibles en la construcción de nuestra definición de sistema autónomo. Veremos aparecer la estabilidad, el equilibrio, el aumento de la complejidad y la

diversidad, la formación de estructuras que sirven de componentes a otras más complejas, las rupturas de simetrías, los cambios de fase, la superación de cuellos de botella.

No nos interesa tanto la concreción histórica como la identificación de estados intermedios entre un sistema más simple y otro más complejo, lo que caracteriza a dichos estados, lo que los diferencia, y las condiciones de paso entre ellos. Lo que buscamos es una base para dar respuesta a la definición de vida como autonomía – no tanto a su origen-; aunque en un mundo en evolución no puedan separarse del todo el origen y la definición de un fenómeno como una estrella o un ser vivo.

Comienza Weinberg cuando el universo tenía cien mil millones de grados de temperatura,<sup>29</sup> una densidad inmensa y continuas colisiones entre las partículas presentes, principalmente fotones, electrones, positrones, neutrinos y antineutrinos. Estima la presencia de un protón o neutrón por cada mil millones de las otras partículas.

El enfriamiento conduce a que la igualdad inicial entre el número de protones y de neutrones vaya evolucionando hacia una proporción cada vez mayor de los primeros, más estables.

Los neutrinos dejan de interactuar con el resto de partículas, se *desacoplan* del resto. Se ha producido una transición de fase<sup>30</sup>. El universo pasa a ser cualitativamente diferente de cómo era un instante antes.

Los electrones y positrones se van aniquilando, creando fotones, hasta disminuir radicalmente.

Cuando la disminución de la temperatura permite superar el cuello de botella de la estabilidad del deuterio, comienza la formación de núcleos de helio, el segundo

---

<sup>29</sup> Nuestro relato podría haber empezado aún más cerca del big bang y, de acuerdo con las teorías actuales, lo que en el relato de Weinberg son partículas elementales y fuerzas fundamentales serían, a su vez, el resultado de componentes más básicos que se han ensamblado y fuerzas más unificadas que se han separado y diferenciado como resultado de la ruptura espontánea de simetrías.

<sup>30</sup> Las sucesivas transiciones de fase que se van produciendo en el universo que se expande son generadoras de orden en él.

elemento de la tabla periódica<sup>31</sup>. Otro cambio cualitativo de las características del universo.

Casi todos los neutrones se unen a protones formando núcleos de Helio. El resto de protones quedan casi todos libres (núcleos de hidrógeno). Los núcleos más pesados, salvo pequeñas presencias de berilio y boro, son inexistentes debido a la aparición de otro cuello de botella a salvar hasta llegar a la estabilidad del carbono.<sup>32</sup>

La unión de electrones y protones, dando lugar a la formación de átomos, se produjo cuando el universo tenía una edad de 380.000 años y una temperatura de tres mil grados. En ese momento los fotones dejaron de interactuar con los electrones (ya ligados en los átomos) y pudieron viajar libremente, dando lugar a la radiación de fondo. Radiación y materia se desacoplaron<sup>33</sup>.

Las primeras estrellas se formaron a partir de entre un 22% y un 28% de helio y el resto de hidrógeno. El *cocinado* de los elementos más pesados se realizaría en ellas cuando las colisiones entre los núcleos dispusiesen de la energía necesaria para salvar el segundo cuello de botella gracias a la fusión nuclear. La nucleosíntesis estelar explica la abundancia de los diferentes elementos en el universo a partir del carbono.

Los elementos generados en las estrellas de primera generación se diseminan después por el universo al explotar estas. Llegaría luego otra generación de estrellas acompañadas de planetas, unas y otros con una diversidad atómica como la que hoy se observa.

El siguiente escalón será la aparición de moléculas, uniones de átomos debidas a las fuerzas electromagnéticas. Con ello entraremos en el reino de la química.

## 9.2 Termodinámica

A mediados del siglo XIX, Joule puso de manifiesto como fenómenos tan diversos como los observados en la electricidad, la química o el calor se relacionan por medio

---

<sup>31</sup> El deuterio (núcleo formado por un protón y un electrón), un paso necesario en la formación del núcleo de helio, es sumamente inestable hasta que han pasado algo más de tres minutos desde el big bang, y la temperatura cae por debajo de los 900 millones de grados.

<sup>32</sup> No existen núcleos estables con el número adecuado de partículas nucleares que faciliten el aumento paulatino de la complejidad hasta llegar al carbono.

<sup>33</sup> Se trata de una nueva transición que conduce a un mundo cualitativamente distinto, nuestro mundo actual de materia y radiación. Los átomos serán los nuevos ladrillos para construcciones de mayor nivel de complejidad estructural.

de una cantidad que se conserva, aunque cambie de forma: la energía. Este descubrimiento supone una unificación de los fenómenos naturales. Las leyes de este mundo fenomenológicamente diverso, inmutable y cambiante, fundamental e histórico, se ajustan al principio de conservación de la energía, primera ley de la termodinámica.<sup>34</sup>

El segundo principio de la termodinámica tiene especial interés para la comprensión de la vida. Carnot, con su estudio de la producción de trabajo por las máquinas térmicas, aportó una primera definición: es imposible realizar trabajo a base de transferir calor de un cuerpo frío a uno caliente.

Clausius separó los conceptos de conservación e irreversibilidad e introdujo la entropía. Aunque la cantidad total de energía se mantiene, su calidad se degrada. El segundo principio afirma que en sistemas aislados la entropía sólo puede mantenerse constante o aumentar. La entropía será constante (y máxima) en el estado de equilibrio. El equilibrio es un atractor hacia el que tiende el sistema.

Boltzman explicó el segundo principio como el aumento del desorden molecular hacia el estado macroscópico más probable<sup>35</sup>.

Diversos sistemas del mundo físico y químico parecen oponerse a esta tendencia al desorden, al cumplimiento de la segunda ley de la termodinámica. En el caso de los seres vivos esta aparente contradicción es especialmente llamativa: es lo que se conoce como la paradoja de Schrödinger, planteada en la obra con la que el físico inaugura el análisis de la vida como orden (Schrödinger, 1944). Pero, la termodinámica clásica abordaba sólo el estudio de los sistemas aislados y la solución a la paradoja, compatible con la termodinámica, habrá que buscarla en el estudio de los sistemas abiertos alejados del equilibrio.

Schneider y Kay (1994) y Schneider y Sagan (2000) aportan una propuesta para acercarse al comportamiento de los sistemas reales con otra visión: el universo aborrece los gradientes.

Su reformulación de la segunda ley para sistemas abiertos queda:

---

<sup>34</sup> La vida también habrá de respetar la conservación de la energía. La fisiología de la respiración fue el primero de los procesos de la vida que se incorporaron a este principio general de conservación.

<sup>35</sup> Nótese que el desorden molecular da lugar a la regularidad macroscópica.

El principio termodinámico que gobierna el comportamiento de los sistemas es que, a medida que se les aleja del equilibrio utilizarán todos los caminos disponibles para contrarrestar los gradientes aplicados. A medida que aumentan los gradientes aplicados, también crece la capacidad del sistema de oponerse a un alejamiento del equilibrio mayor (Schneider y Kay, 1994, pág. 29).

Su análisis de los datos experimentales del fenómeno de las células de Bénard se ajusta bien a esta aversión creciente a los gradientes. Cuando el gradiente de temperatura entre dos placas paralelas que tienen dentro un fluido llega a un punto crítico, el proceso de disipación del calor cambia de la conducción a la convección, formando el fluido células hexagonales. Si se sigue aumentando la diferencia de temperatura, se producen reorganizaciones de las células que favorecen la disipación del calor, que se resisten mejor al aumento del gradiente. Para estos autores

Ya no es una sorpresa la emergencia de estructuras autoorganizadas, sino más bien es una respuesta esperada del sistema en su intento de resistir y disipar gradientes aplicados externamente que alejarían al sistema del equilibrio (Schneider y Kay, 1994, págs. 33-34).

Su análisis sobre la oposición a los gradientes y la consiguiente aparición de orden puede aplicarse de igual modo a fenómenos diversos, como tornados o huracanes.

Consideremos ahora, de forma general, la extensión del campo de estudio de la termodinámica, más allá de los sistemas aislados.

La termodinámica estudia magnitudes fenomenológicas que pueden generalizarse como flujos: transporte de calor, difusión de materia, velocidad de reacción química, etc. De igual modo, pueden definirse fuerzas generalizadas, causantes de dichos flujos. En primer lugar nos encontramos con los sistemas cercanos al equilibrio. Esta región se explica por las relaciones de reciprocidad de Onsager, ecuaciones lineales que ponen de manifiesto el acoplamiento entre fuerzas y flujos<sup>36</sup>. El sistema evoluciona hacia un estado estacionario de mínima producción de entropía compatible con las restricciones a las que esté sometido. Alcanzado dicho estado, si se mantienen las condiciones exteriores el sistema se mantendrá estable. El estado final está unívocamente determinado por dichas condiciones. En la termodinámica lineal, los

---

<sup>36</sup> Ejemplos son las leyes que relacionan el flujo de calor con la diferencia de temperatura (Fourier), la difusión de la concentración con la concentración química (Fick) o la corriente eléctrica y la resistencia (Ohm).

sistemas tienden al mínimo de nivel de actividad compatible con los flujos que los alimentan.

Más allá de la región de Onsager, las relaciones entre flujos y fuerzas dejan de ser lineales y desaparece la posibilidad de encontrar un atractor único (un estado al que tender) aunque las restricciones exteriores del sistema se mantengan constantes. El sistema se convierte en inestable y las fluctuaciones locales, en lugar de amortiguarse, pueden amplificarse a nivel macroscópico. Como en el caso de las células de Bénard, pueden aparecer fenómenos de autoorganización.

Prigogine introdujo el concepto de estructura disipativa<sup>37</sup> para estos casos en los que la disipación de materia y energía, lejos del equilibrio, se convierte en una fuente de orden. Al sistema se le presentan bifurcaciones, caminos a elegir que abren alternativas de autoorganización y que conducen a nuevos estados estables; su respuesta corresponde a lo que Prigogine llama *orden por fluctuaciones*. Estos sistemas se mantienen alejados del equilibrio por medio del intercambio de energía y materia con el exterior. Su entropía disminuye (aumenta el orden) a costa de aumentar la entropía global.

Prigogine y la escuela de Bruselas han estudiado especialmente las estructuras disipativas en el mundo de la química y han mostrado como, en presencia de gradientes químicos, se producen ciclos de reacciones autocatalíticas autoorganizadas que aumentan la capacidad disipativa del sistema.

Entre los procesos implicados en la vida encontramos algunos a los que pueden aplicarse las relaciones de Onsager y otros muchos que habrán de explicarse como propios de sistemas fisicoquímicos alejados del equilibrio. En todo caso, el cumplimiento con las leyes que describen el mundo físico, especialmente la termodinámica, serán un condicionante a tener muy en cuenta en la explicación de la vida.

---

<sup>37</sup> Tradicionalmente se habría asociado la idea de disipación con las de pérdida y evolución hacia el desorden. Ilya Prigogine propuso el término *estructura disipativa* para referirse a sistemas físicos que (i) están alejados del equilibrio, (ii) reciben energía del exterior, la emplean para realizar trabajo y disipan la restante (iii) como resultado del trabajo realizado, estos sistemas se autoorganizan, formando estructuras coherentes (que sirven, a su vez, para continuar aprovechando la energía y generando trabajo).

## 10. A partir del átomo: química y organización

### 10.1 Estabilidad y autoensamblaje

En nuestra descripción del paso del big bang a la aparición de los átomos, el problema de la estabilidad tiene, sin duda, una presencia principal. Las partículas elementales se crean y se destruyen en colisiones, determinados núcleos tienen una vida media muy elevada mientras otros desaparecen al instante de aparecer. La estabilidad depende también de las condiciones exteriores, especialmente de la temperatura o, lo que es igual, de la energía transmitida en las colisiones.

Estabilidad es la cualidad de mantenerse sin cambio, sin desaparecer. Es una característica del sistema en sí mismo y también de su respuesta a los cambios en el entorno. Una partícula puede desintegrarse espontáneamente o desaparecer por su interacción con otra.

La estabilidad de un sistema cualquiera implica también la capacidad de recuperación del estado inicial después de sufrir perturbaciones moderadas.

La primera estructura formada a partir de componentes más elementales que consideraremos es el átomo<sup>38</sup>. La estabilidad de los átomos, el hecho de que los electrones no colapsen sobre los núcleos, atraídos por los protones, se explica con la mecánica cuántica, de hecho este problema es uno de los que dieron lugar a la aparición de dicha teoría.

Nuestro relato de la evolución del universo debe seguir con la aparición de las moléculas, uniones fuertes entre dos o más átomos, atraídos por la fuerza electromagnética. La explicación fundamental de su formación y estabilidad reside también en la mecánica cuántica, pero, en la práctica, es más abordable por medio del estudio de los enlaces químicos con teorías como la del enlace de valencia (método de Heitler-London) y la teoría de los orbitales moleculares<sup>39</sup>.

Los enlaces que forman las moléculas son de tipos distintos –enlace iónico o covalente- dependiendo de la estructura de los átomos implicados en la nueva entidad,

---

<sup>38</sup> Obviamos la explicación de protones y neutrones a partir de quarks que intercambian gluones. Este salto no supone un cambio sustancial en la argumentación que se presenta y evita alargar más la explicación.

<sup>39</sup> No nos interesa aquí el detalle de las teorías químicas citadas. Lo que se quiere destacar es que (i) contamos con teorías adecuadas para la explicación de los enlaces que unen las moléculas y (ii) dichas teorías se sustentan en la mecánica cuántica.

de la posición que ocupan en ellos los electrones, especialmente los más exteriores. Los enlaces químicos determinan la estructura de las moléculas. Si hablamos de moléculas individuales, su estabilidad, derivada de las fuerzas fisicoquímicas, es una característica fundamental a considerar.

Consideremos ahora una gran cantidad de moléculas sometidas a movimientos aleatorios, impulsadas por su historia previa y las fuerzas fundamentales. Cuando dos moléculas A y B chocan (se acercan y se alejan) tienen una cierta probabilidad de formar parte de una reacción química del tipo  $A + B \rightarrow C + D$ , en la cual unas moléculas (reactantes) dan lugar a otras (productos). Es el problema de la afinidad química. Estos procesos se estudian desde la perspectiva de la cinética química, partiendo de la proporcionalidad entre la velocidad de reacción y las concentraciones de los productos que participan en ella.

Pero las moléculas que colisionan también pueden no cambiar, pero quedar enganchadas. Pueden quedar unidas por fuerzas intermoleculares, también de naturaleza electromagnética, considerablemente más débiles que los enlaces intramoleculares, típicamente en un factor de diez. Las principales son las interacciones dipolo-dipolo, como el puente de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals<sup>40</sup>. En este caso A y B se habrán ensamblado:  $A + B \rightarrow AB$ . En pasos posteriores podrían unirse nuevas moléculas, o conjuntos de ellas, formando una estructura más compleja.

Con lo expuesto hasta ahora, además de estabilidad, podemos ya hablar de autoensamblaje. En general, el autoensamblaje es un proceso por el cual un sistema adquiere una estructura, un patrón, un orden global, como consecuencia de las interacciones locales entre sus componentes. En química se dice que varias moléculas se autoensamblan cuando espontáneamente se organizan en estructuras más complejas. Con espontáneamente queremos decir que la organización aparece sin necesidad del concurso de agentes externos. Son las interacciones locales entre las moléculas las que dan lugar a la unión y a la nueva estructura.

## 10.2 Autoensamblaje y autoorganización

Tanto autoensamblaje como autoorganización son términos con los que se hace referencia a procesos en los que se produce un orden global a partir de interacciones locales. Aunque bajo el paraguas de ambas palabras caben procesos bien diferentes,

---

<sup>40</sup> Vale una aclaración similar a la de la nota precedente.

el uso de una u otra depende principalmente de la rama de estudio. Algunos autores prefieren distinguir entre autoensamblaje estático y dinámico.

Distinguiremos autoensamblaje de autoorganización atendiendo a consideraciones termodinámicas.

La termodinámica del equilibrio explica la aparición de estructuras ordenadas como los cristales. Estas estructuras de equilibrio se definen, de hecho, a escala molecular; son las interacciones moleculares las que proporcionan sus propiedades al cristal. El tamaño del cristal no supone mayor complejidad, no es una característica propia de la estructura, sólo responde a la cantidad de materia. Los cristales se forman por la agregación de moléculas que se autoensamblan.

Hablaremos de autoensamblaje para referirnos a procesos que tienden al equilibrio. Un sistema es el resultado del autoensamblaje de sus componentes cuando, debido a las propiedades de éstos y a las interacciones entre ellos, se configura como una estructura estable sin la necesidad de aportación de energía desde el exterior.

En la autoorganización, por el contrario, el orden que emerge en un sistema no se debe directamente (no sólo) a las propiedades de sus componentes, sino también a que las interacciones locales entre ellos se hacen no lineales en sistemas alejados del equilibrio.

Multitud de fenómenos en el mundo de la física y la química se ajustan a procesos autoorganizativos. Ejemplos típicos son las células de Bénard, los tornados o la combustión de una vela.

Prigogine y la Escuela de Bruselas iniciaron el estudio de la autoorganización desde la perspectiva de la termodinámica. Sus estructuras disipativas son sistemas abiertos, alejados del equilibrio, que exhiben ciclos materiales y energéticos. A partir de relaciones reguladoras locales no lineales se producen bifurcaciones y transiciones entre estados estables. En cada uno de ellos el sistema se autoorganiza, se dota de una estructuración. Las estructuras disipativas no sólo no contradicen la segunda ley de la termodinámica (que se aplica a sistemas aislados), sino que favorecen su cumplimiento facilitando la anulación de gradientes energéticos. Las aportaciones de Prigogine permiten establecer una continuidad entre los fenómenos fisicoquímicos y los sistemas vivos.

Como exponen Halley y Winkler (2008), un sistema autoorganizado, a nivel macroscópico es un sistema ordenado, fuera del equilibrio y que disipa energía. Dicho

sistema surge por la multiplicidad de interacciones no lineales entre sus componentes microscópicos. El orden es, en realidad, fruto de interacciones entre factores internos y externos al sistema y desaparece si se elimina la fuente de energía.

Resaltaremos otra interesante diferencia entre autoensamblaje y autoorganización, adelantando otro aspecto a tener en cuenta en nuestro estudio: la complejidad. La autoorganización, a diferencia del autoensamblaje, tiene necesidad de un número mínimo de componentes para producirse. Sólo se autoorganizan sistemas que superan un cierto umbral de complejidad. La autoorganización es una propiedad emergente de ciertos sistemas complejos.

### **10.3 Automantenimiento e infraestructura**

Álvaro Moreno (2007) propone una secuencia de pasos de creciente complejidad organizativa como el camino que conduce desde el mundo fisicoquímico a los seres vivos. En su modelo, entre la autoorganización y la autonomía básica el papel primordial lo juega el concepto de automantenimiento.

Los sistemas autoorganizados más simples están aún muy cercanos a la mera agregación de componentes y a la respuesta lineal a las condiciones exteriores. Para aumentar su complejidad, el sistema autoorganizado debe, antes que nada, contar con la capacidad de automantenerse.

En un entorno alejado del equilibrio, la aparición de interacciones locales no lineales entre los componentes del sistema genera una dinámica que produce un orden global que le permite independizarse, en cierta medida, de las condiciones exteriores. Es la no linealidad la que aporta características como el feed back positivo y negativo que refuerzan o contrarrestan los cambios del entorno.

Ejemplos de sistemas automantenidos simples (triviales), son las repetidamente citadas células de Bénard o los huracanes. Se trata de sistemas aún muy dependientes de las condiciones exteriores. Pero son ya las estructuras disipativas de Prigogine que se mantienen gracias a las constricciones externas, y también a constricciones internas creadas por ellas mismas.

El siguiente paso, que permita una mayor plasticidad, una mayor capacidad de responder a cambios en el entorno debe venir de un crecimiento en la propia complejidad organizativa del sistema, de la aparición y el mantenimiento de diferencias no sólo entre el sistema y el entorno, sino también dentro del propio sistema. El sistema automantenido no trivial debe contener diferencias internas que le permitan

mantenerse; habrá de caracterizarse por la multiplicidad de componentes y relaciones internas entre ellos. Las partes del sistema asumirán funciones diversas, cuyo mantenimiento dependerá de la totalidad de los componentes y de las interacciones entre ellos. La clave de este fenómeno holístico está en la recursividad funcional: cuando surge un nuevo componente o una nueva relación entre componentes, se mantendrá en el sistema en sólo si constituye una nueva función que contribuye al mantenimiento del sistema; por otra parte, el sistema *mejorado* por la nueva función facilitará la aparición de nuevos componentes y relaciones, es decir, de nuevas funciones .

El automantenimiento no trivial se caracteriza por la capacidad del sistema de modificarse a sí mismo para dar respuesta a situaciones cambiantes. El sistema adquiere así la capacidad de independizarse, hasta cierto punto, del entorno; adquiere autonomía.

Para llevar esto a cabo, se requiere la aparición de constricciones locales que generen nuevos elementos y nuevas interacciones que den paso a nuevas constricciones y así sucesivamente. El nuevo sistema automantenido no trivial debe, por tanto, ser un sistema químico. En las reacciones químicas se originan nuevas moléculas y nuevas interacciones, se producen nuevas posibilidades de combinación y organización de los distintos elementos.

Mark Bickhard (2000) hace un planteamiento que se complementa con el de Moreno. Considera que la clave de la autonomía está en la diferencia de las contribuciones de los distintos estados alejados del equilibrio a su propia estabilidad. En el caso más simple encontramos sistemas que dependen casi exclusivamente del exterior para su continuidad.

En un grado intermedio están los sistemas que ya hacen importantes contribuciones a su persistencia, a los que llama automantenidos. Su ejemplo es la llama de una vela, que evapora la cera y obtiene nuevo combustible; induce convección en el aire que la rodea, apartando los restos de la combustión y consiguiendo nuevo oxígeno. La vela puede luchar contra el agotamiento del oxígeno en sus proximidades (tiende a automantenerse), aunque no puede resolver el problema de que el combustible se acabe (tiene aún importantes limitaciones).

Todavía hay sistemas que manifiestan mayor capacidad de contribuir a su persistencia. Son más autónomos; la autonomía se presenta como una cuestión de grado en la capacidad de contribuir a su persistencia. Se trata de sistemas que no sólo

contribuyen a su automantenimiento de una manera más o menos simple, sino que despliegan procesos diferentes en función de las condiciones exteriores a las que se enfrentan. Bickhard cita el caso de una bacteria que puede nadar en un gradiente de azúcar o dejarse llevar. Cuenta con dos modos de interacción distintos y cambia de uno a otros según las circunstancias. Cada forma de interacción contribuye al automantenimiento del sistema; con el cambio de una a otra el sistema automantiene también su capacidad de seguir automanteniéndose. Bickhard hace ver que este *automantenimiento recursivo* es una forma mucho más fuerte de autonomía; el sistema es capaz de mantenerse no sólo en ciertos intervalos de las condiciones exteriores, sino también dentro de ciertos rangos de cambios de dichas condiciones.

El automantenimiento recursivo requiere del sistema una cierta infraestructura que le permita cambiar entre las diferentes estrategias de que dispone. Esta infraestructura ha de mantenerse y actualizarse en una escala temporal distinta, mayor, que la que corresponde a los procesos de mantenimiento del sistema.

La infraestructura a la que nos referimos y el automantenimiento recursivo necesitan la resolución de aspectos energéticos e informacionales. Estos últimos estarán directamente implicados en los procesos de cambio entre procesos de automantenimiento. Los energéticos estarán presentes tanto en dichos procesos de cambio como en los propios procesos de automantenimiento.

Cabe entonces definir un nivel intermedio de autonomía que Bickhard sitúa entre el automantenimiento y el automantenimiento recursivo. En él no estarían aun presentes los mecanismos de gestión de la información –y, por tanto, estos sistemas no tendrían la capacidad de cambiar entre distintos procesos de mantenimiento- pero su infraestructura les permitiría ya dirigir la energía para la realización de trabajo relevante para su propio automantenimiento.

## **11. Complejidad y diversidad**

### **11.1 Ciencias de la complejidad**

Kauffman estudia la autocatálisis desde la perspectiva de la complejidad. Muestra como existe una gran probabilidad de que se formen conjuntos moleculares autorreproductores en el seno de sistemas complejos de reacciones químicas. A medida que crece la diversidad molecular en el sistema de reacciones, se alcanza un umbral mínimo en el que emergen espontáneamente redes de reacciones químicas colectivamente autocatalíticas y autorreproductoras.

Contempla el sistema como un grafo reactivo catalizado, una red de relaciones interdependientes. Al aumentar la complejidad, hay un punto en el que una enorme cantidad de sustratos y productos queda conectada en un subgrafo gigante de reacciones catalizadas. Las teorías de redes y subgrafos constituyen una ayuda importante para la comprensión de los procesos que conducen a la autonomía.

El surgimiento de la red autocatalítica descrito por Kauffman es también una transición de fase. Podemos apoyarnos el concepto de transición de fase –por el que un sistema pasa de un estado de equilibrio a otro, a menudo de forma discontinua- que ya ha sido objeto de detallado estudio en el ámbito de la termodinámica y aplicado a un amplio espectro de sistemas fisicoquímicos. Las transiciones de fase están asociadas a parámetros de orden propios del sistema y, en general, reflejan la oposición entre el orden y las fluctuaciones, entre las interacciones microscópicas y el desorden térmico. Sólo se dan en sistemas compuestos de un gran número de partículas.

Análogo apoyo puede obtenerse de lo aprendido por la ciencia desde finales del siglo XIX sobre la ruptura de simetrías en los sistemas de la física y la química. O por el desarrollo de las teorías matemáticas sobre la criticalidad autoorganizada, en las que el incremento de la complejidad es consecuencia casi inevitable de sistemas que constan de muchos elementos que interactúan entre sí.

En general, la ciencia de la complejidad plantea un acercamiento al estudio de la naturaleza que es distinto al de la ciencia clásica y que se ha mostrado adecuado para la explicación de ciertos procesos fisicoquímicos, biológicos e incluso sociales.

Podemos convenir con Prigogine y Stengers (1979) en fijar el comienzo de la ciencia de la complejidad en 1811, con la teoría de Jean-Joseph Fourier sobre la propagación del calor en los sólidos. El flujo de calor entre dos cuerpos es proporcional al gradiente de temperatura entre ellos. Se trata de una teoría física matemáticamente tan rigurosa como la mecánica clásica, pero ajena al mundo newtoniano.

Los trabajos de Prigogine que dieron lugar a la termodinámica de sistemas alejados del equilibrio fueron un hito clave en el desarrollo del nuevo enfoque científico. La nueva termodinámica introduce el tratamiento científico de la irreversibilidad y da un nuevo papel al tiempo. La flecha del tiempo y la complejidad están inseparablemente unidos.

Además de las teorías citadas, la ciencia de la complejidad abarca otros enfoques como la teoría del caos, la teoría de las catástrofes, la vida artificial, los fractales o las lógicas no clásicas.

Los estudios sobre el caos muestran la imposibilidad de predecir ciertos fenómenos naturales pero abren nuevos caminos para su explicación. Ponen además de manifiesto la conexión entre fenómenos separados en el espacio, y la relación entre causas pequeñas y efectos impredecibles y de gran dimensión.

La teoría de catástrofes persigue desde las matemáticas la aparición de cambios súbitos e imprevistos en un sistema.

La ciencia de la complejidad aborda los fenómenos renunciando al control detallado de los mismos, propio del ideal newtoniano. Desde un punto de vista lógico, un enfoque diferente se hace inevitable a partir de los teoremas de completitud de Gödel que muestran la imposibilidad de definir la verdad de un sistema por el sistema mismo ni tampoco en referencia a los elementos y las relaciones que lo articulan; dichos teoremas nos conducen a un enfoque que necesariamente ha de ser sistémico y multidisciplinar.

## **11.2 Diversidad: hacia lo adyacente posible**

Pero, si la condición necesaria para el automantenimiento y la autonomía es la complejidad del sistema y la complejidad requiere diversidad molecular, ¿de dónde surge dicha diversidad?

Según los cálculos de Kauffman (2000), hace cuatro mil millones de años en nuestro planeta había unos pocos cientos de tipos de moléculas orgánicas; hoy encontramos miles de millones de moléculas distintas. Moléculas diferentes van continuamente apareciendo como productos de las reacciones químicas que se dan entre las moléculas ya existentes.

Para analizar este fenómeno introduce el concepto de lo adyacente posible. En un momento dado, el conjunto de los tipos de moléculas que aún no existen pero están a un solo paso (a una reacción) de las existentes constituyen lo adyacente posible.

Kauffman propone como principio para la comprensión de la vida el avance hacia lo adyacente posible. Dicho avance se ajustaría al máximo ritmo compatible con la sostenibilidad del sistema. La aparición de cambios en el metabolismo celular o las tasas de mutación frente al tamaño del genoma se mantendrían ligeramente por debajo del umbral crítico a partir del cual se produciría la *catástrofe del error* y se perdería el orden conseguido. El ritmo de exploración se ajustaría al máximo sostenible.

Apoya esta idea en los sistemas observables. El metabolismo celular implica unas mil moléculas orgánicas. Las células son subcríticas, la generación de variaciones en ellas se mantiene por debajo del umbral de seguridad. Si fueran supracríticas se generaría demasiada diversidad molecular para ser seleccionada, no se mantendría la organización propagativa, se produciría la catástrofe del error. Mantenerse subcríticas limita la velocidad de avance hacia lo adyacente posible. Cita los estudios de Eigen y Schuster que muestran que las tasas de mutación de los virus respecto al tamaño de los genomas los mantiene cerca, pero por debajo, de la catástrofe del error. Las bacterias, que son más complejas metabólicamente, tienen menores tasas de mutación. El ritmo de exploración se ajustaría en ambos caos al máximo sostenible.

Kauffman enuncia la evolución hacia lo adyacente posible como una propuesta de cuarta ley que complete la termodinámica:

Como tendencia media, las biosferas y el universo crean novedad y diversidad lo más rápidamente que les es posible sin destruir la organización propagativa acumulada, la cual constituye el nexo fundamental mediante el que tal novedad es descubierta e incorporada a dicha organización (Kauffman, 2000, pág. 124).

Otros autores, como Schneider y Sagan (2005) entienden que no es necesaria una cuarta ley, que basta con desarrollar la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio.

### **11.3 Diversidad: una justificación**

Fundamentaremos ahora el avance hacia la diversidad en nuestra explicación del mundo físico. Para ello, revisaremos primero los conceptos de *probabilidad de ocurrencia* y de *estabilidad* y veremos qué papel juegan en el mundo descrito por la cosmología y las ciencias fisicoquímicas.

Desde Maxwell la probabilidad es en física un principio explicativo y no sólo un instrumento de aproximación. El comportamiento de un sistema macroscópico puede analizarse por medio de la estadística debido a que está compuesto por una enorme cantidad de partículas.

Desde Schrödinger y Heisenberg la probabilidad es también una característica intrínseca que atribuimos a la naturaleza. Las leyes físicas son, por tanto, doblemente estadísticas. Con ellas intentamos predecir y explicar la frecuencia con la que ocurren los fenómenos, si se deja pasar un tiempo suficientemente grande. Esto se aplica a

fenómenos tan diversos como la desintegración de una partícula, a las reacciones químicas o al movimiento estructurado de fluidos.

Seguramente la incertidumbre cuántica está en la base de todas las incertidumbres. En todo caso, en la justificación del avance del universo hacia la diversidad, la probabilidad de ocurrencia (que tiene su base en las características de la naturaleza) debe estar presente.

Consideremos ahora la estabilidad. Describimos el mundo físico con leyes inmutables pero también reconocemos su dimensión histórica. Incluso los componentes elementales del mundo que observamos tienen una duración temporal limitada y, una vez más, marcada por la naturaleza estadística. Este hecho es aún más presente en sistemas complejos: una estrella, un ecosistema, un ser vivo. Si comparamos sistemas distintos en un mismo entorno, unos presentan una vida media mayor que otros; permanecen presentes durante más tiempo; son más estables, más robustos ante los cambios exteriores. Esto es así en todos los sistemas, comenzando con los que estudian la física y la química. Si ha de haber avance hacia la diversidad, la estabilidad de los sistemas implicados ha de jugar un papel de primera importancia.

Veamos, por último, como encajar probabilidad y estabilidad en el devenir del mundo.

El impulso de todo cuanto ocurre tiene su origen en el big bang y sus reglas básicas de funcionamiento en el mundo que describimos con las leyes de la física y la química. A escala macroscópica nuestra explicación se apoya también en la termodinámica. Como señalan Wicken

La termodinámica es, por encima de todo, la ciencia de los procesos espontáneos, el "ímpetu" de las cosas. (Wicken, 1987, pág. 5).

Durante determinados periodos de tiempo y en ciertos lugares del espacio (como ocurre en nuestro planeta desde su formación) átomos y moléculas se ven constantemente empujados unos contra otros.

En este mundo, compuesto de elementos en continua interacción, se generan continuamente nuevas posibilidades. El mundo de la química avanza hacia lo adyacente posible. Y lo hace a la velocidad que se deriva de la probabilidad de ocurrencia y la estabilidad que corresponden a cada elemento, cada proceso, cada sistema implicado. De todo cuanto puede ocurrir, ocurre más veces lo que es más probable; y permanece más tiempo lo que es más estable. Y todo ello sucede de acuerdo con las leyes de la naturaleza.

Estas consideraciones constituyen ya un principio de avance hacia la diversidad. El mundo avanza, aunque no como tendencia general hacia el progreso y la perfección propia de la teleología cósmica, sino sólo como un juego estadístico de lo posible, lo probable y lo duradero.

Nuestro principio sería que el mundo evoluciona hacia lo adyacente posible haciendo más veces uso de lo más probable y manteniendo más tiempo lo más estable. Si las colisiones entre moléculas son suficientemente abundantes, de este principio se sigue la tendencia de los distintos sistemas a mantenerse ligeramente subcríticos en su avance hacia la diversidad.

## 12. Componentes de un sistema autónomo

### 12.1 Autocatálisis

Hemos visto que, de acuerdo con el análisis del automantenimiento no trivial que hace Moreno, el sistema autónomo habrá de ser un sistema químico. Continuemos, por tanto, el relato que nos había llevado desde el big bang al autoensamblaje químico.

En una reacción química del tipo  $A + B \leftrightarrow C + D$ , en función de la concentración de las distintas moléculas, se establece una situación de equilibrio. Si se aumenta la cantidad de componentes a uno u otro lado de las flechas, en general la dinámica química tiende con eficacia a recomponer el equilibrio. Las relaciones entre los componentes que entran y salen son lineales.

La diferencia surge en la química con la catálisis. Gracias a ella aparecen las estructuras disipativas también en el reino de la química. Frente a la estabilidad a la que tiende en general la dinámica química, contamos con un resultado de validez general que permite la aparición de las estructuras disipativas de Prigogine

... en una cadena de reacciones químicas que se desarrollan en un sistema, los únicos pasos de reacción que, bajo ciertas condiciones y circunstancias, pueden poner en peligro la estabilidad del estado estacionario son precisamente los 'bucles catalíticos', i.e. los pasos en los cuales un producto de una reacción química participa en su propia síntesis" (Prigogine y Stengers, 1979, pág. 183).

Los sistemas autónomos deben por tanto partir de redes de reacciones químicas autocatalíticas. La autocatálisis es el primero de los componentes de nuestro sistema autónomo.

Hemos comentado el análisis que hace Kauffman (2000) de la catálisis desde las ciencias de la complejidad. Completamos ahora su visión con su descripción del espacio de funciones catalíticas, en el que cada punto representa una función catalítica, es decir el enlace con el estado de transición de una reacción. Una enzima podría cubrir una esfera de funciones catalíticas similares. Y así la catálisis resulta ser más fácil de lo esperable a primera vista. Un número finito de esferas podría de hecho cubrir el espacio completo de funciones catalíticas.

Para tener un conjunto de moléculas colectivamente autocatalítico se requiere que toda especie molecular provenga del exterior, como alimento, o tenga al menos la etapa final de su síntesis catalizada por uno o más miembros del conjunto.

Al crecer la diversidad de moléculas, crece más rápido la de reacciones entre ellas. Típicamente cuando existe una reacción catalizada por cada especie molecular surge una red catalizada gigante. La emergencia de conjuntos autocatalíticos es relativamente sencilla. Este autor concluye que la vida sería una propiedad emergente y esperable de ciertas redes de reacciones químicas. Aceptaremos que el automantenimiento y la autonomía sí lo son.

El espacio de funciones catalíticas es no local. El cierre catalítico es una propiedad del sistema como un todo. El cierre de funciones catalíticas requiere establecer las funciones en sí, más los sustratos específicos cuyos productos constituyen los propios catalizadores que desarrollan tales funciones. Se produce así un dualismo entre catalizador y catalizado una recursividad funcional necesaria para el automantenimiento.

Kauffman propone que, tal vez, desde el big bang exista un conjunto de procesos autocatalíticos por el que surgirían sistemas fuera del equilibrio de creciente complejidad y diversidad.

## **12.2 Membrana**

Consideraremos ahora la necesidad de una frontera lógica y física del sistema autónomo desde varios puntos de vista que se complementan.

En primer lugar, revisemos nuestro relato que conduce desde las partículas elementales presentes en los primeros momentos del universo hasta la autonomía, y consideremos la distinción aplicable en cada caso entre sistema y entorno. En los primeros pasos, incluido el autoensamblaje químico, distintos componentes elementales (un electrón, un átomo, una molécula) se unen para formar estructuras

mayores, pero este aumento de complejidad se explica a partir de las características de las partes implicadas y las fuerzas que las unen. En cada paso no es necesario tener en cuenta la estructuración previa de cada componente, sólo las características que muestra hacia el exterior. Lo que tenemos en cada caso son dos o más componentes que interaccionan para formar un ente más complejo, no tanto un sistema y un entorno exterior a él.

A partir de la autoorganización hemos de hablar ya de estructuración interna y de interacciones con el exterior, y consecuentemente de funciones de las partes y de agencia del sistema. En primer lugar, desde este punto de vista (de argumentación lógica) el avance hacia la autonomía hace precisa la definición de una frontera que diferencie entre el sistema y el entorno, que sea el plano de contacto a través del cual se produce la interacción.

Ha de plantearse también una segunda consideración: el sistema autoorganizado es un sistema abierto alejado del equilibrio que realiza ciclos materiales y energéticos. Si definimos un límite que separe el sistema del resto del mundo, dicho límite debe permitir la entrada y salida del sistema, aunque no necesariamente simétricas, de energía y materia.

En tercer lugar, hemos visto que el automantenimiento no trivial requiere que los sistemas a considerar sean sistemas químicos y que en el mundo de la química sólo los conjuntos de reacciones autocatalíticas pueden dar lugar a las estructuras disipativas con las que comienza la autoorganización. También hemos mostrado que la autocatálisis surge y se mantiene sólo si se da una adecuada diversidad molecular y unas concentraciones de moléculas situadas en determinados rangos. En un sistema sin cierre físico esto no podría mantenerse ante el menor cambio en las condiciones que rodean al sistema.

Por último, el automantenimiento no trivial, el establecimiento de infraestructura interna en el sistema, la capacidad funcional y la agencialidad requieren asimetría dentro del sistema y, lo que ahora nos importa más, asimetría entre el interior y el exterior del mismo. Esto sólo puede darse si el sistema está separado (y unido) al entorno por una frontera física activa que realice un tratamiento distinto de las entradas y las salidas de los componentes materiales y de la energía. El sistema autónomo necesita, como elemento constitutivo, una membrana semipermeable<sup>41</sup>.

---

<sup>41</sup> Adelantándonos a lo que diremos en el capítulo 15 sobre el papel de la membrana en el origen de la vida, diremos ahora que entre los que defienden la aparición del metabolismo

Lo que aquí se defiende es que la membrana es una construcción fisicoquímica que forma parte del sistema, no un cierre externo al mismo, y su desarrollo debe ser simultáneo al de los conjuntos de reacciones autocatalíticas que generan y mantienen los componentes interiores. La membrana ha de ser un producto más de esas reacciones. Interior y frontera deben coevolucionar<sup>42</sup>.

La membrana ha de ser otro de los componentes esenciales de un sistema que haya de tener autonomía.

### 12.3 Energía

Nuestro sistema autónomo no es constructo puramente formal, sino que representa un penúltimo paso hacia la definición más ambiciosa de vida, la que conjugue autoproducción y evolución. Los sistemas autónomos que nos interesan son los que se dan en el mundo real, que está compuesto por los elementos que estudian la física y la química. La explicación de los nuevos sistemas puede requerir nuevas leyes y nuevas estrategias como las aportadas por la ciencia de la complejidad pero, debe comenzar por cumplir las más básicas. Es por ello que se hace preciso plantearse el papel que ha de jugar la energía.

En primer lugar, en un sistema autónomo, en los procesos internos que lo construyen y mantienen, y en los procesos que realizan su interacción con el entorno, se debe cumplir el principio de conservación de la energía. Nuestro sistema, termodinámicamente abierto, lo podemos imaginar como una esfera (membrana) en el que lo que entra es igual a la suma de lo que cambia el interior y lo que sale. Y lo mismo puede decirse de cada proceso individual que tenga lugar en su interior.

Por otra parte, el sistema y el entorno como un todo deben cumplir con la segunda ley de la termodinámica, la degradación de la energía. Hemos visto que la termodinámica de sistemas alejados del equilibrio explica como las estructuras disipativas contribuyen

---

antes que la replicación siempre ha jugado un papel primordial la temprana formación de una estructura de cierre espacial. En el campo de teorías de primero la replicación, se comenzó dejando para el final la aparición de la célula. Es de destacar, sin embargo, que recientes evidencias experimentales han conducido a un cambio en los defensores de la prioridad de la replicación. La necesidad de la formación temprana de compartimentos cerrados constituye hoy un punto de vista mayoritario en todos los estudiosos del origen de la vida sea cual sea su tendencia (Fry, 2010).

<sup>42</sup> Sin perjuicio de aceptar, en la línea de Oparin, que los primeros pasos hacia la catálisis habrían aprovechado protomembranas lipídicas cuya formación es menos exigente desde el punto de vista de la física y la química.

a este fin. El sistema autoorganizado, a nivel macroscópico es un sistema autoordenado, fuera del equilibrio y que disipa energía.

Lo hemos analizado desde puntos de vista complementarios. La creación y el mantenimiento de una infraestructura interna requieren la continua aportación de energía desde el exterior del sistema. El despliegue de la capacidad funcional y agencial del sistema no son posibles sin el consumo de energía. La autoorganización precisa canalización de energía y realización de trabajo para crear constricciones y asimetrías internas y con el exterior (y el trabajo requiere, a su vez, restricciones a la liberación de energía).

Nuestro sistema autónomo toma cuerpo en el mundo real por medio de conjuntos de reacciones químicas autocatalíticas. Las reacciones químicas pueden ser exergónicas o endergónicas. Gran parte de los procesos que dan lugar a un sistema que se autoconstruye y se automantiene a costa de la energía exterior han de ser forzosamente endergónicos, sólo así podrá generarse un crecimiento global de la diferenciación dentro del sistema. El propio sistema, visto como un todo, puede considerarse un proceso endergónico. Pero el sistema autónomo también requiere procesos exergónicos. Si la energía que se aporta al sistema debe desencadenar efectos, realizar un trabajo propagativo, si se han de producir ciclos, lo que se necesita es el acoplamiento de procesos exergónicos y endergónicos.

Un proceso exergónico podría, en principio, pasar energía a uno endergónico de distintas formas; la más fácil pero la menos eficiente sería aportarle calor. En un mundo de reacciones químicas sería preferible –y esperable- un acoplamiento químico entre procesos. Pero, ante la gran diversidad de acoplamientos que habrán de darse (los requiere la complejidad, que es a su vez condición previa de la autocatálisis) lo más sencillo sería pensar en un intermediario de uso común en todos los casos. Es lo que Ruiz-Mirazo y Moreno (2004) llaman una moneda de energía, un elemento que facilita el intercambio. Y, como indican estos autores, al menos sería necesaria otra moneda más, diferente de la anterior, para dar solución al problema del transporte de la energía. Para cerrar el ciclo, una moneda y otra deben ser interconvertibles.

El mecanismo de gestión de la energía es el componente tercero, y último, necesario para constituir un sistema autónomo. Como hemos visto en el apartado 5.4 y completado ahora, los tres ingredientes del sistema autónomo están interrelacionados, cada uno de ellos depende de los otros dos para poder realizarse. Su aparición a partir de sistemas químicos en condiciones alejadas del equilibrio ha de coincidir en el tiempo, deben coevolucionar.

# RECAPITULACIÓN Y TEMAS ABIERTOS

## 13. Naturalización de la autonomía biológica

En la sección dedicada a *La vida como autonomía* se ha expuesto la autonomía biológica, eje sobre el que desarrollar nuestra definición de la vida. Esa parte del trabajo terminaba poniendo de manifiesto la necesidad de fundamentar la autonomía biológica partiendo de las ciencias que explican el mundo inanimado, extendiendo su aplicación a ámbitos que no les son habituales y completando los aspectos necesarios para la comprensión de la vida que no son atendidos habitualmente por dichas ciencias.

En la sección *Del mundo físico a la autonomía biológica* se ha pretendido cubrir esa necesidad. En nuestro camino de la simplicidad a la complejidad, del mundo inanimado a la autoorganización y la autonomía, ha sido necesario contar con lo que saben la física fundamental, la cosmología, la termodinámica, la química; pero también la teoría de sistemas, la organización o la ciencia de la complejidad.

Repasaremos ahora los pasos dados y presentaremos algunos de los caminos que aún conviene recorrer.

### 13.1 Pasos dados

Hablamos de vida natural –en la Tierra o en cualquier otra parte del universo- y, por tanto, nos interesan los sistemas que pueden darse a partir de los componentes propios del mundo físico y que están sometidos a sus leyes<sup>43</sup>. Hemos buscado, por tanto, en la naturaleza los cimientos y los andamios que nos permitan comprender la construcción de un sistema autónomo.

La física y la química nos han aportado los componentes básicos de todo cuanto observamos y nos han explicado la formación de estructuras cada vez más complejas y diversas. Hemos visto que en los pasos que van desde las partículas elementales hasta el autoensamblaje químico, la complejidad conlleva orden y equilibrio.

La termodinámica, que comenzó presentando una contradicción entre el desorden del crecimiento de la entropía y el orden de los sistemas vivos, no ha sido sólo un condicionante a tener en cuenta en la definición de sistema autónomo. También se ha

---

<sup>43</sup> No hemos considerado el problema de la *vida artificial* en este trabajo, salvo un comentario breve al final del apartado 15.4.

convertido en un instrumento principal para la realización de dicha tarea; ha resultado ser la herramienta adecuada para pasar del autoensamblaje a la autoorganización.

Desde ahí, el camino que hemos seguido puede sintetizarse en: autoorganización, automantenimiento, estructura interna y autonomía.

La autoorganización –a diferencia del autoensamblaje- requiere realización de trabajo y disipación de energía. La realización de trabajo continuo requiere que nuestro sistema sea un sistema abierto alejado de equilibrio, una estructura disipativa.

Se trata de un sistema alimentado por energía externa y, por ello, la gestión de la energía –su captación, utilización y disipación- debe ser un elemento básico a tener en cuenta en la definición del sistema desde el primer momento.

Por otra parte, y eso también lo hemos aprendido de la termodinámica, la realización de trabajo a partir de un flujo continuo de energía implica el establecimiento de ciclos en el sistema que la canalicen y utilicen.

Pero la estructuración interna (y consiguientemente el automantenimiento no trivial) sólo pueden aparecer si se dan relaciones entre los componentes del sistema que permitan los adecuados cambios locales que afecten tanto a dichos componentes como a las relaciones que se establecen entre ellos. Es en el mundo de las reacciones químicas donde encontramos esta flexibilidad. Nuestro sistema ha de estar regido por las leyes de la química.

La química y la termodinámica juntas nos conducen a la autocatálisis. La autocatálisis da cuenta de la formación de estructuras disipativas a partir de componentes químicos. Abre el camino a la realización de trabajo continuo a partir de la formación y el mantenimiento de ciclos de reacciones. Genera estructuras de componentes químicos y, con ello, complejidad y diferenciación. Da solución a la producción de los componentes necesarios para el mantenimiento del sistema, su crecimiento y su reproducción.

Así, partiendo de las leyes fisicoquímicas básicas y la termodinámica han aparecido la energía y la autocatálisis como componentes fundacionales del sistema autónomo. También han sido razonamientos fisicoquímicos los que nos han conducido a incorporar la membrana como tercer componente de nuestro sistema.

## 13.2 Cabos por atar

Si la termodinámica ha sido una de las principales líneas que hemos seguido en la naturalización del concepto de autonomía biológica, es también uno de los campos en los que aún queda mucha tarea por realizar. Es necesario seguir profundizando en cómo surge la autoorganización y el automantenimiento en los sistemas alejados del equilibrio. Cómo aparecen ciclos internos que se mantienen estables. Cómo se crean restricciones en el sistema y se produce trabajo. Cómo se ajusta el sistema a los cambios en el entorno. Cómo se crean asimetrías internas en el sistema.

Cabe, para ello, el estudio termodinámico de sistemas físicos y químicos reales, siguiendo los patrones de investigación tradicionales de las ciencias básicas, contrastando a la postre la teoría con la naturaleza. Vale también la simulación con el apoyo del ordenador que permiten un análisis más rápido de hipótesis y consecuencias, la formulación de modelos simples, como el bruselador<sup>44</sup> de la escuela creada por Prigogine. También son útiles los trabajos de formalización de la termodinámica de sistemas abiertos, como los de Schneider.

Por otra parte, hemos visto que el sistema autónomo básico consta de tres componentes: autocatálisis, gestión de la energía y membrana. Cada uno de ellos por separado, pero también las interdependencias que se dan entre ellos, plantean cuestiones en las que es necesario profundizar.

El estudio de los procesos autocatalíticos debe continuar apoyándose en las reacciones implicadas, en las matemáticas de la no linealidad y en la ciencia de la complejidad que explica la emergencia de propiedades en sistemas con muchos componentes. En esta tarea caben tanto experimentos in vitro como simulaciones por ordenador.

La catálisis está intrínsecamente relacionada con la energía<sup>45</sup>. El análisis de la autocatálisis y los procesos energéticos del sistema han de ser inseparables. Los

---

<sup>44</sup> El bruselador es un modelo diseñado para estudiar numéricamente la catálisis cruzada y la no linealidad, y analizar la diversidad de fenómenos de organización a los que dan lugar. Puede definirse con las siguientes cuatro reacciones químicas:

- (i)  $A \rightarrow X$
- (ii)  $B + X \rightarrow Y + D$
- (iii)  $2X + Y \rightarrow 3X$
- (iv)  $X \rightarrow E$

<sup>45</sup> Los catalizadores operan disminuyendo la energía de activación de una reacción química, permiten que dicha reacción se produzca ayudando a superar una barrera energética que la impedía.

mecanismos de intercambio y almacenamiento de energía, su papel en el desencadenamiento de procesos locales y en la conformación del sistema global, también ameritan una atención importante.

La formación de membranas, su capacidad de realizar las funciones que les atribuimos en nuestro sistema autónomo –en relación con la asimetría de componentes entre el sistema y su entorno, la incorporación y eliminación de energía y materia- presentan un amplio campo de investigación experimental.

En la sección anterior se han analizado los estados intermedios que justifican la posibilidad de un sistema autónomo en un mundo físico y se ha justificado el paso de cada uno de ellos al siguiente. Se trata de cambios cualitativos que precisan explicaciones más detalladas. Lo aprendido de las transiciones de fase –que incluyen los cambios de estado de la materia, el ferromagnetismo, la superconductividad o el desacoplamiento radiación materia- también ha de valer para explicar cómo surgen los niveles crecientes de complejidad y estructuración que llevan a la autonomía.

Hemos explicado –hasta cierto punto- *cómo* es posible la existencia de cada escalón y *cómo* puede pasarse de uno a otro. Pero faltan aún muchos detalles; un análisis más fino de cada etapa y cada salto en el camino hacia la autonomía deben plantear nuevos *cómos* a responder y abrir nuevas vías de investigación teórica y experimental.

La respuesta a estas nuevas preguntas contribuirá a explicar cómo la vida es posible, y dará también luz a otra cuestión importante: determinar si es la vida algo excepcional o algo esperable en un universo regido por las leyes que le atribuimos. Abordar estos problemas desde la perspectiva de la autonomía biológica debe contribuir a su elucidación y también al sostenimiento de la concepción de vida como autonomía.

## **14. Capacidad de evolución abierta**

En el capítulo 6, especialmente en el apartado 6.2, se resaltaron las diferencias que separan la autonomía básica de la vida, al menos tal y como se presenta hoy en nuestro planeta.

En la sección *Del mundo físico a la autonomía biológica*, se persiguió la integración de la concepción de la vida como autonomía dentro de una visión más global del mundo. En esta tarea se evitó intencionadamente el análisis de los últimos pasos la definición de vida como autonomía, los que conducen desde el sistema básico a un sistema

capaz de replicarse siguiendo instrucciones almacenadas de acuerdo con un código. Nuestro objetivo principal era dar soporte al concepto de autonomía.

Consideraremos ahora las diferencias cualitativas que separan un sistema autónomo básico de un ser vivo.

### **14.1 Vida y selección natural**

La concepción de la autonomía considera que la vida es un proceso propio de determinados sistemas individuales y pone el foco en el estudio del organismo. Algunas de las propuestas de sistemas autónomos que hemos revisado plantean que lo esencial de la vida comienza y acaba en el individuo. En ellas autonomía y vida son lo mismo.

En el extremo opuesto se colocan quienes consideran la vida sólo como un proceso colectivo, dejando al individuo un papel secundario y supeditado al mantenimiento y la evolución del grupo.

La propuesta de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) defiende en primer lugar el papel de la autonomía biológica, y por tanto da prioridad al individuo, pero completa su definición de vida con el requerimiento de que el sistema autónomo adquiera la capacidad de participar en un proceso de evolución abierta. De este modo se configura como una solución integradora para ambas visiones.

Este planteamiento tiene importantes virtudes. En primer lugar, contamos con un camino plausible (y analizable), compuesto de pequeños pasos, que conduce del mundo básico más simple al sistema autónomo. Si dividimos el problema en pequeñas etapas, no tan distantes entre sí, es más fácil explicar la diferencia entre lo simple y lo complejo, entre el caos molecular y el orden del sistema final. Los resultados obtenidos en el estudio de fenómenos fisicoquímicos diversos, la termodinámica del no equilibrio y el desarrollo de nuevos campos de la ciencia han hecho abordable este problema. Resulta más difícil naturalizar la alternativa opuesta; encontrar explicaciones para el surgimiento del proceso de selección natural a partir de una colección de elementos, más o menos complejos, hasta entonces inanimados. A la vista de las leyes de la naturaleza, la vida explicada por esta concepción sería una propiedad *excesivamente emergente*, demasiado poco probable.

En segundo lugar, como parte del perfeccionamiento de la autonomía, el sistema incorpora elementos que le permiten almacenar información y utilizarla para dar el salto de la reproducción imprecisa a la replicación. Con esto el sistema autónomo

puede ya participar en el proceso de la selección natural. El código genético establece un vínculo entre el organismo individual y la población; el mismo vínculo que hay entre las visiones de la vida centradas en las propiedades individuales y las que priorizan las propias del grupo.

Queda por analizar la aparición de la capacidad de evolución abierta en el sistema autónomo básico.

## 14.2 Cuellos de botella

Como hemos visto en el punto *De la autonomía básica al ser vivo*, Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno (2004) explican los últimos pasos hacia la vida tal y como la conocemos, estableciendo la aparición (inevitable) y la superación (necesaria) de dos cuellos de botella en el aumento de la autonomía. Justifican su superación en el hecho de que, como observamos en los seres vivos actuales, la evolución de la autonomía no se frenó en el sistema autónomo básico, sino que aparecieron nuevas estructuras, capaces de mantener una creciente complejidad y transmitirla con fidelidad a los descendientes.

Para abordar el análisis de los que enfrenta sistema autónomo, primero aclararemos a qué nos referimos cuando hablamos de cuello de botella, y revisaremos algunos que ya hemos mencionado con anterioridad en éste trabajo y que son bien comprendidos por la ciencia. En general, el concepto de cuello de botella hace referencia a un fenómeno en el que la capacidad o la viabilidad de un sistema se ven comprometidas por alguno de los componentes o procesos que forman parte de él.

En el punto dedicado a *Física fundamental y cosmología* hemos mencionado dos cuellos de botella que hubo de superar la evolución del universo para poder poblarse de elementos químicos diversos. El primero de ellos tenía su causa en la inestabilidad del deuterio por encima de los 900 millones de grados. Sin deuterio estable no podía continuar la nucleosíntesis. La solución fue la bajada de la temperatura del universo. El problema y la solución se explican, en este caso, con la mecánica cuántica y la expansión del universo. El segundo cuello de botella era la dificultad de formación de núcleos de carbono sin la existencia de otros núcleos estables con el número adecuado de protones y neutrones para avanzar paso a paso hacia la complejidad. La solución la aportaron las reacciones nucleares en el interior de las estrellas. En ambos casos tenemos bien identificados el problema y el mecanismo de superación. Tenemos respuestas teóricas y las podemos confrontar experimentalmente con la naturaleza.

Veremos ahora hasta qué punto puede alcanzarse el mismo objetivo para los cuellos de botella que tuvo que superar el sistema autónomo básico, que se han expuesto en el apartado 6.2.

Comenzaremos con argumentos que son aplicables a ambos y distinguiremos luego entre uno y otro. En primer lugar, la historia evolutiva de la autonomía biológica podría haber acabado en la autonomía básica, pero, si admitimos que el sistema autónomo básico es el precursor de los sistemas vivos actuales, concluimos que la naturaleza encontró la solución para seguir aumentando su complejidad y su autonomía.

Por otra parte, en la sección anterior hemos visto que el mundo se ve inmerso en un avance hacia la diversidad, condicionado por unas leyes que regulan el juego estadístico entre lo probable y lo duradero. Así se habrían generado propuestas de solución a los problemas evolutivos, sobre las que habría actuado luego una selección aun no darwiniana. El aumento de la complejidad va planteando problemas que la diversidad y la selección van resolviendo. En la mayor parte de los casos los cambios evolutivos pueden considerarse graduales y continuos.

Pero, en último término, si comparamos el sistema autónomo básico con el sistema vivo actual más simple –la célula- vemos que, para pasar de uno a otro, han de producirse cambios cualitativos que añadan a la autocatálisis *básica* la infraestructura *final* que resumimos en dos polímeros y un código. Parece inevitable que la naturaleza optase por realizar estos cambios (al menos) en dos pasos. Es más fácil que dos acontecimientos excepcionales ocurran por separado –uno detrás de otro, según va siendo preciso- que simultáneamente<sup>46</sup>.

Centrémonos ahora en el primero de los cuellos de botella. En el sistema autónomo básico nuevas moléculas surgirían continuamente, contribuyendo a su mantenimiento y renovación. El aumento de complejidad de la autocatálisis y la simplicidad del ensamblaje químico habrían dado lugar a la aparición de macromoléculas con funcionalidades específicas. Algunas de ellas podrían haber asumido la función de servir de plantilla para facilitar la copia, la replicación fiable de estructuras que dan soporte a funcionalidades complejas. Hablamos de un tipo de polímero que habría sustentado la funcionalidad y la complejidad en su longitud y en el orden que ocupan en él los monómeros que lo forman. En principio, el procedimiento más simple para obtener un objeto complejo igual (o similar) a otro dado –que es lo que necesita el

---

<sup>46</sup> Este argumento es similar al utilizado por Dyson (1999) en su defensa del *doble origen* de la vida, aunque él lo utilizaba para justificar la aparición primero del metabolismo y luego de la replicación. Aquí usamos el argumento del doble paso para llegar desde el metabolismo (cuya aparición ya damos por explicada) a la capacidad de evolución abierta.

sistema para reproducirse transmitiendo sus características- , es hacer una copia del original. Y el mecanismo más sencillo para realizar una copia es utilizar una plantilla. La solución natural para este cuello de botella es, por tanto, la aparición de un tipo de polímero capaz de facilitar la copia de estructuras y funciones complejas. Esta superación del cuello de botella admite una defensa como la aquí realizada, una fundamentación en las ciencias fisicoquímicas y, lo que es más importante, puede ponerse a prueba con simulaciones con ordenador y someterse a contrastación experimental en el laboratorio.

La superación del segundo cuello de botella plantea varios problemas. En primer lugar, la solución encontrada por la vida en la Tierra –el mundo de los dos polímeros y un código genético- podría no ser única forma de conseguir una capacidad de evolución abierta.

Por otra parte, aun admitiendo el punto de partida –un polímero- y el de llegada –de dos polímeros y un código- cabrían diversos caminos alternativos para llegar del uno al otro. Podría conjeturarse una especialización funcional, y consecuentemente estructural, en dos polímeros cada vez más diferentes, a partir de un polímero inicial. Pero podría también pensarse en un origen independiente para cada uno de los dos polímeros. Uno de ellos habría tenido éxito por su capacidad de simplificar la complejidad creciente de la autocatálisis. El otro podría haber comenzado, al margen de los intereses del metabolismo, con la aparición de mecanismos que habrían aportado la copia instruida de componentes y procesos sencillos. Esta capacidad es, por si misma, útil para la propagación de un sistema. El estado final se habría conseguido coordinando uno y otro por medio del código genético.

La complejidad de la resolución del segundo cuello de botella se pone de manifiesto en los seres vivos actuales, en los que, además del ADN, el ARN –mensajero y el de transferencia- y las proteínas hay que incluir también los ribosomas (compuestos de ARN y proteínas) para explicar el mecanismo de traducción del código genético. La comprensión de la compleja máquina molecular que es el ribosoma es fundamental para la explicación de la aparición del mecanismo genético actual<sup>47</sup>.

La mayor dificultad que nos plantea la explicación del segundo cuello de botella tiene varias causas. En primer lugar, hay que citar el profundo cambio cualitativo que supone la transición del sistema autónomo hereditario al sistema vivo. En segundo término puede mencionarse la multitud de herramientas teóricas necesarias para

---

<sup>47</sup> Ver anexo sobre la infraestructura para la capacidad de evolución abierta.

abordar el problema, desde las ciencias fisicoquímicas a la ciencia de la complejidad. Por último, según nos alejamos de los sistemas sencillos de la física se hace más difícil la contrastación experimental de las distintas hipótesis.

## 15.El origen de la vida

El objetivo de este trabajo es analizar cómo la concepción de vida como autonomía biológica sirve de base para dar una respuesta a la pregunta ¿qué es la vida? Aunque definición y origen de vida son dos problemas formalmente distintos, es a menudo inevitable –y casi siempre fructífero- relacionarlos. Trataremos ahora brevemente las principales cuestiones que se presentan a quienes estudian el origen de la vida y discutiremos luego cómo afectan a (y se ven afectadas por) la definición de vida como autonomía.

### 15.1 La hipótesis Oparin-Haldane y la tesis de la continuidad

El bioquímico ruso A. I. Oparin y el genetista británico J. B. S. Haldane fueron en los años veinte del siglo XX los precursores de la investigación científica sobre el origen de la vida, que comenzaría su desarrollo a partir de los años cincuenta.

Partiendo de presupuestos distintos y utilizando vías diferentes –que marcarían el nacimiento de dos tradiciones competidoras: la metabólica y la genetista-, ambos científicos defendieron que la gran distancia existente entre la materia inanimada y la célula viva debería poder explicarse por medio de una cadena de pasos sucesivos. Un paso clave habría sido la abundante síntesis de componentes orgánicos en algún momento de la historia de la Tierra primitiva. Los dos aportaron hipótesis sobre las condiciones geofísicas y los componentes de la atmósfera primitiva que habrían favorecido dicha síntesis.

Iris Fry (2000) explica con detalle la evolución histórica de los pensamientos de Oparin y de Haldane. Nos interesan ahora los puntos de coincidencia que dieron lugar a la hipótesis que lleva el nombre de ambos, y que resumimos en lo siguiente. Tomando como base el conocimiento disponible en la época sobre la formación del sistema solar y de la Tierra, parten de una tierra primitiva rodeada por una atmósfera reductora<sup>48</sup>. Sus componentes serían amoníaco, metano, hidrógeno y agua. Las frecuentes y

---

<sup>48</sup> Una atmósfera reductora (que puede ceder electrones) habría favorecido la formación de componentes orgánicos complejos. Como veremos después, el supuesto de la atmósfera reductora ha sido descartado por la ciencia. Se han propuesto, en su lugar, otras alternativas como entorno en el que pudo comenzar la síntesis de monómeros orgánicos.

fuertes tormentas eléctricas y la radiación ultravioleta habrían aportado la energía necesaria para favorecer reacciones químicas entre estas moléculas que habrían dado lugar a la formación de monómeros orgánicos, como monoazúcares, aminoácidos y bases nitrogenadas. Al enfriarse el planeta por debajo de cien grados centígrados, gran parte de la atmósfera se habría condensado, dando lugar a la formación de los océanos, una *sopa primordial*, compuesta de agua con compuestos orgánicos en disolución. Nuevas aportaciones de energía –esta vez de origen principalmente térmico- y otras condiciones fisicoquímicas facilitadoras de la condensación, habrían conducido a los procesos de formación de polímeros orgánicos.

Como destaca Fry (2000) la importancia de la hipótesis Oparin-Haldane radica en que aporta una tercera alternativa, que supera el enfrentamiento tradicional entre vitalismo –para el que vida y materia son categorías separadas- y el materialismo simplista –que iguala vida y materia, desatendiendo la gran complejidad de los seres vivos más simples. La hipótesis Oparin-Haldane supone la posibilidad –y la necesidad- de explicar las propiedades únicas de los seres vivos por medio de procesos naturales, trazando una línea de continuidad y evolución desde el mundo inanimado hasta la vida.

Su contenido filosófico, la alternativa materialista-evolutiva, proporciona el marco necesario para la investigación científica sobre el origen de la vida a pesar de las diferencias de opinión sobre los escenarios históricos específicos (Fry, 2000, pág. 77).

En otro trabajo, la misma autora aporta un planteamiento más general y lo concreta en la *tesis de la continuidad*:

La tesis de la continuidad es la asunción de que no existe ninguna brecha insalvable entre la materia inorgánica y los sistemas vivos, y que, bajo condiciones físicas adecuadas, la emergencia de la vida es altamente probable (Fry, 1995, incluido en Bedau y Cleland, 2011, pág. 137).

La hipótesis de la continuidad es un presupuesto filosófico que forma parte de una visión naturalista del mundo. No se deriva de la investigación sobre el origen de la vida. Es, por el contrario, una condición necesaria para dicha investigación. Se opone a la visión de que la vida emergió como fruto de un *accidente feliz*, como defienden los creacionistas –no científicos- pero también algunos científicos como Monod, Mayr y Crick. La idea de accidente feliz impide la posibilidad de investigar científicamente cómo emergió la vida; la hipótesis de la continuidad afirma que el desarrollo de la vida

a partir de la materia inanimada es un proceso gradual que puede estudiarse a partir de principios físicos.

Es en este marco de naturalismo filosófico en el que encuadramos las investigaciones sobre el origen de la vida.

## 15.2 Las etapas de la evolución prebiótica

En su revisión del origen de la vida en la Tierra, Dyson (1999) divide la evolución prebiótica en tres etapas, que denomina geofísica, química y biológica. Cada etapa tiene su propio campo de estudio<sup>49</sup>.

La etapa geofísica corresponde a la evolución de la Tierra primitiva. La Tierra se formó hace 4.500 millones de años. Frente a lo admitido por Oparin y Haldane –y por los primeros investigadores experimentales como Miller- lo que indica hoy la ciencia es que la atmósfera terrestre, aunque en algún momento inicial hubiera podido ser reductora, fue químicamente neutra al menos entre hace 3.800 millones de años y hace 2.000 de años. Cuando la vida comenzó –hace entre 3.800 y 3.500 millones de años- la atmósfera era neutra. La atmósfera se hizo oxidante, hace 2.000 millones de años, cuando la vida ya había desarrollado organismos que liberaban oxígeno gracias a la fotosíntesis.

Una nueva propuesta, justificada por los descubrimientos en el fondo oceánico, ha sustituido a la atmósfera como proveedora de las condiciones adecuadas para la síntesis de monómeros orgánicos. El entorno reductor y energético que necesitábamos pudo haberse dado en las profundidades marinas. Las chimeneas en las dorsales medio-oceánicas emiten agua muy caliente, saturada de sulfuros de hierro, hacia un entorno de agua marina fría. Como puede comprobarse experimentalmente, esto da lugar a la formación de membranas que se cierran creando burbujas gelatinosas, que absorben moléculas orgánicas y favorecen la catálisis.

---

<sup>49</sup> Dyson, como es habitual, analiza el origen de la vida en la Tierra. El problema general del origen –en cualquier lugar y en cualquier momento de la historia del universo- se aborda después generalizando las conclusiones obtenidas. Cabría un planteamiento general desde el principio, y entonces sería conveniente incluir una etapa previa, que podríamos llamar cosmológica. De ella se derivarían, condiciones de generalidad, propias de la física fundamental y la cosmología, y aplicables a todo el universo conocido. Aquí tiene cabida lo expuesto sobre física fundamental y cosmología. La termodinámica o el papel especial que juega el carbono en la aparición del resto de elementos químicos y en el origen de la vida habrían de tenerse también encuentra en esta etapa.

A la etapa química concierne la síntesis de los componentes básicos de la vida a partir de fenómenos naturales. El experimento precursor de Miller consiguió la síntesis de aminoácidos en una atmósfera reductora, compuesta de metano, amoníaco, hidrógeno y agua, sobre la que hizo pasar descargas eléctricas.

Tras muchos años de experimentos de este tipo, la síntesis de nucleótidos se ha mostrado más problemática. Un nucleótido es la unión de tres partes, una base orgánica, un azúcar y un ion fosfato. La dificultad se presenta en la síntesis de las bases y de los azúcares, y también en la unión de los tres componentes elementales.

Las etapas geofísica y química presentan las características adecuadas para la investigación propia de las ciencias básicas: contamos con rastros de lo que ocurrió, en la tierra y en el cielo, y podemos contrastar nuestras teorías con ellos. Podemos realizar experimentos para simular pasos concretos de la evolución prebiótica.

La etapa biológica debe dar cuenta de la aparición de la organización biológica y, con ella, del origen de la vida. Esta etapa, que analizaremos en el punto siguiente, incluye los pasos más complejos y difíciles de contrastar.

### **15.3 Las teorías sobre el origen de la vida**

Habitualmente (ver Fry, 2000 y 2010), las teorías sobre el origen de la vida se agrupan de acuerdo con la visión que tienen los investigadores sobre el tipo de infraestructura química que habría sido la primera en aparecer y servir de base a un proceso evolutivo. Se distinguen dos tradiciones, que provienen de dos ciencias distintas: la bioquímica y la genética. Son, respectivamente las posiciones *primero el metabolismo* y *primero los genes*; hemos visto que sus precursores fueron Oparin y Haldane. En esta clasificación se encuadran y subdividen las diversas propuestas teóricas y se justifican los distintos experimentos. Las etapas geológica y química de Dyson son las condiciones en las que debe dirimirse la contienda. Con este enfoque, la aparición de una estructura física que cierra al ser vivo, la membrana, y con ello la célula, puede ser una condición previa –a estudiar como parte de la etapa química- o un resultado del inicio de la vida –de la etapa biológica. Las dos alternativas caben tanto en el campo de los metabolistas como en el de los genetistas. Puede defenderse, como tercera opción, que la constitución del organismo como unidad separada de (que interactúa con) el entorno exterior es también una característica básica del ser vivo, una característica que habría de tenerse en cuenta al encuadrar las teorías sobre el origen.

Por otra parte, la clasificación de las teorías teniendo sólo en cuenta la controversia metabolismo-replicación, favorece una visión de *un solo origen*<sup>50</sup>. Dada la dificultad experimental apreciada en la síntesis de proteínas y de ácidos nucleicos, cabe valorar si conviene hablar de un origen o de dos orígenes (sucesivos) de la vida. Es más fácil que dos acontecimientos que requieren condiciones complejas y diferentes se den por separado.

Dyson (1999) tiene en cuenta las dos consideraciones anteriores. Tres son para él los componentes cuya aparición –simultánea o sucesiva- ha de explicarse y que han de servir de base para categorizar las teorías: las enzimas, los genes y la célula. Desde esta perspectiva, clasifica las teorías acerca del origen de la vida en tres grupos, que ejemplifica con Oparin, Eigen y Cairns-Smith. Las dos primeras surgieron como teoría de origen único; la segunda es, desde su nacimiento una teoría de origen doble. El propio Dyson propone una teoría de origen doble inspirada en la explicación de Margulis sobre el origen de las células eucariotas<sup>51</sup>.

Oparin propone que primero habrían aparecido las células –gotas de coacervado-, después las enzimas y, por fin, los genes. Oparin es el iniciador de las teorías que dan prioridad al metabolismo sobre la replicación. Y también el primero en proponer la necesidad de un entorno cerrado para que la vida pueda desarrollarse.

Para Eigen primero son los genes, luego las enzimas y por último las células. La teoría de Eigen está entre las que consideran que todo comenzó con el mundo-ARN; el ARN habría sido el primer autorreplicador. Se basa en los conceptos de cuasi-especies e hiperciclos. Una cuasi-especie es una población de moléculas de ARN relacionadas genéticamente, capaces de autorreplicarse, y sometidas a una selección darwiniana que habrían favorecido a las moléculas que se acercan a la norma de la cuasi-especie. Los hiperciclos hacen referencia a la asociación entre cuasi-especies y poblaciones de enzimas proteicas, que habrían dado paso a que las distintas cuasi-especies se facilitasen la replicación unas a otras.

La teoría de Cairns-Smith se basa en que los cristales microscópicos que se forman en la arcilla común pudieron ser el sustento de la primera replicación. Esos cristales

---

<sup>50</sup> Hablar de origen único no implica suponer un salto milagroso. Todos los trabajos científicos sobre el origen de la vida, se enmarcan en la hipótesis de la continuidad, y aceptan la necesidad de una evolución progresiva que habría superado múltiples escalones.

<sup>51</sup> Margulis introdujo la explicación de la célula eucariota a partir de la invasión de una célula procariota por otra. La célula invasora sería primero portadora de una enfermedad, que sería después un parasito, luego un simbiote y por fin parte de una estructura integrada más compleja. La célula eucariota es, así, el resultado de la simbiosis de dos células procariotas.

habrían dirigido la síntesis de moléculas enzimáticas absorbidas sobre su superficie. Luego, arcilla y enzimas juntas habrían desarrollado membranas para encerrarse en ellas formando células. Según este relato, podría haber existido una vida primitiva basada en la arcilla. La aparición posterior del ARN –más eficiente que la arcilla como material genético- habría supuesto una gran ventaja evolutiva y se habría impuesto; la vida antigua se habría extinguido. Cairns-Smith denomina a este proceso de sustitución *relevo genético*. El resumen de aparición en escena de los diferentes actores habría sido: primero la arcilla, luego las enzimas, en tercer lugar las células y, por último los genes.

Dyson parte de que, de acuerdo con los experimentos, los nucleótidos son más difíciles de sintetizar que los aminoácidos y, además, menos estables. Esto le lleva al campo de los metabolistas. Su propuesta comienza con células en las que se realizan procesos metabólicos dirigidos por enzimas y que se reproducen de forma estadística. En algunas células se habría producido la síntesis de adenosín trifosfato (ATP), una molécula especializada en el transporte de energía; su presencia se habría extendido por resultar una importante ventaja competitiva para los procesos celulares. Un nucleótido, el adenosín monofosfato (AMP) es muy similar al ATP y habría surgido como subproducto de la abundancia de ATP. A su vez, la abundancia de AMP habría conducido a la síntesis de ARN, y ésta es ya una molécula capaz de replicarse. De acuerdo con este relato, el ARN habría surgido como una enfermedad parasitaria de las células primitivas, que habrían aprendido a superarla y habrían evolucionado, pasando por una situación de simbiosis, hacia células más complejas dotadas ya un aparato replicador basado en ácidos nucleicos.

No es objetivo de este trabajo la profundización en las teorías del origen de la vida ni en el soporte experimental de cada una de ellas. Nos hemos limitado a apuntar aspectos claves que son de utilidad al problema que aquí tratamos: la concepción de vida como autonomía. A relacionar definición y origen dedicamos el siguiente punto.

#### **15.4 Autonomía biológica y origen de la vida**

Consideremos primero la cuestión desde la perspectiva del origen. El estudio de la aparición de la vida a partir del mundo inanimado no puede abordarse sin una definición de vida, más o menos precisa. Conocemos el punto de partida: el mundo descrito por las ciencias fisicoquímicas. Necesitamos fijar el punto de destino. Habitualmente se escoge la célula actual más simple como meta. Esta célula es un ser vivo y su origen se toma como paradigma del origen de la vida. Lo que se investiga, en

primer término, es el origen de la vida actual en la Tierra. La generalización de la solución al problema del origen de la vida exigirá, antes o después, tener en consideración una concepción de vida que distinga lo vivo de lo inerte, y lo que es propio de la vida en actual en la Tierra de lo que es accidental y fruto de la historia concreta de nuestro planeta.

Por su parte, la definición de vida no necesita, en principio, haber atender al problema del origen; en general, pueden definirse un sistema o un proceso teniendo sólo en cuenta su manifestación actual, sin necesidad de conocer cómo se originó. Consideremos dos definiciones de vida analizados en este trabajo. La autopoiesis de Maturana y Varela, tal y como la hemos expuesto, puede analizarse con independencia de cómo se produce la aparición del sistema autoproducido; su definición no tiene relación con el origen de la vida. Esto es posible porque nos presentan la vida como un producto acabado, y esa es una de las causas que dificultan la profundización en el concepto de vida. Una definición menos abstracta habría de ser una definición construida para tender puentes entre lo inanimado y lo vivo. Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno construyen su definición de vida como autonomía, paso a paso, a partir de los condicionantes impuestos por el mundo fisicoquímico. Es a la vez una definición de vida y, en cierto modo, una respuesta sobre el origen. No nos dice cómo comenzó la vida en la Tierra, pero sí propone los pasos que deberían seguirse, en cualquier lugar y momento, para llegar a la vida a partir del mundo inanimado.

Profundicemos en estos argumentos relacionando la investigación sobre el origen de la vida con la propuesta de vida como autonomía con capacidad de evolución abierta.

En primer lugar, analizaremos la definición de vida de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno *como si fuese* una teoría sobre el origen de la vida<sup>52</sup>. Nos apoyaremos en las herramientas conceptuales desarrolladas en los puntos anteriores.

Los autores citados definen la vida partiendo de condicionantes fisicoquímicos y definiendo etapas evolutivas y mecanismos de paso ente ellas. Es este un acercamiento que se ajusta a la tesis de la continuidad de Fry y constituye un proyecto científico de investigación sobre el origen.

---

<sup>52</sup> Hemos advertido en el capítulo 2 que la definición de Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno es una definición genealógica. Define los pasos que conducen del mundo inanimado a la vida; *construye* la vida desde lo inanimado, por pasos sucesivos. Las teorías sobre el origen investigan qué ocurrió en la tierra –pero también qué debe ocurrir en otro momento y lugar– para que surja la vida. En los párrafos siguientes se pone de manifiesto la estrecha relación entre una definición genealógica y una teoría sobre el origen.

La etapa biológica de Dyson comienza en este caso con la autoorganización. La autoorganización emerge en sistemas químicos alejados del equilibrio y se concreta en procesos de autocatálisis. Nuestra teoría es, por tanto, enmarcable dentro del grupo de las que defienden que primero fue el metabolismo.

La autoorganización da paso al automantenimiento, primero trivial y luego basado en una infraestructura cada vez más compleja, y a la autonomía. Estos pasos se explican con el apoyo de las herramientas de la ciencia. El sistema autónomo básico preconiza la coevolución de catalizadores, monedas de energía y membrana. Los tres elementos son básicos en la formulación de la teoría. La propuesta es: *la energía, la (proto)célula y el metabolismo primero*.

Del sistema autónomo básico se pasa a la vida acabada superando dos cuellos de botella. Siguiendo a Dyson diremos que es una teoría de origen doble –sistema autónomo básico y replicación- o triple –autonomía básica, mundo de un solo polímero y capacidad de evolución abierta. Nótese que el sistema autónomo básico no es menos vida que la que resulta del primer origen en la teoría de Dyson<sup>53</sup>.

Ruiz-Mirazo, Peretó y Moreno exigen autonomía y capacidad de evolución abierta en su definición de vida. Los pasos intermedios de aumento de la complejidad y la autonomía que constituyen su relato admitirían convenir *el origen* en una etapa anterior. Eso es, de hecho, lo que hacen en general quienes fijan el inicio de la vida en la aparición del metabolismo o de la replicación. Sólo el descubrimiento fuera de la Tierra de organismos a medio camino hacia la evolución abierta –por ejemplo representantes del sistema autónomo hereditario de un polímero- obligaría a decidir qué aceptamos como vida y qué no, o a distinguir entre varias definiciones de vida.

Consideremos ahora cómo la concepción de vida como autonomía con capacidad de evolución abierta puede condicionar las investigaciones sobre el origen de la vida. En primer lugar, la identificación de pasos concretos que hace la definición de vida analizada, al considerar esta definición como una teoría sobre el origen, facilita la identificación de campos de estudio teórico y de investigación experimental. Proporciona un marco global en el que atacar el problema por partes.

En segundo término, hemos de repetir que la propuesta analizada se incluye en el campo de los metabolistas. En consecuencia la investigación teórica sobre los

---

<sup>53</sup> La vida primitiva de Dyson consta de células en las que se realizan procesos metabólicos dirigidos por enzimas y que se reproducen de forma estadística.

primeros pasos y los experimentos de síntesis química de polímeros deberían centrarse en la obtención de proteínas, antes que ácidos nucleicos.

Teniendo en cuenta el papel otorgado a la obtención, utilización y disipación de energía -como constricción, pero también como fuente de orden y de autonomía-, los procesos energéticos, al nivel de las reacciones químicas básicas implicadas y también al nivel global de la célula, habrían de ser objetivo primordial de investigación.

La membrana es en esta propuesta un elemento básico constituyente del sistema, no una condición previa ni un resultado. La investigación básica sobre la formación y el comportamiento de membranas debería aportar importante luz en el problema del origen de la vida.

Por último, recordamos que el sistema autónomo básico es un sistema químico. Algunas de sus características intrínsecas son propias de las reacciones químicas –y en último término dependen de las características básicas de la naturaleza que describe la mecánica cuántica. En las investigaciones sobre vida artificial, si lo que se pretende es realizar pasos en la construcción de vida real, habría que dar prioridad a la vida artificial mojada (wet)<sup>54</sup>.

---

<sup>54</sup> Como recuerdan Bedau y Cleland (2010: 217-223) en su análisis sobre la vida artificial y la biología sintética, la investigación vida artificial puede subdividirse en tres categorías, denominadas en inglés soft, hard y wet. La primera categoría hace relación a las simulaciones por ordenador; la segunda a implementaciones realizadas sobre silicio, metal y plástico; y la tercera a la síntesis de vida en un tubo de ensayo.

## CONCLUSIÓN

La vida puede analizarse como un fenómeno propio del individuo –el organismo, el ser vivo- o como un fenómeno colectivo regido por la selección natural. La concepción de vida como autonomía apuesta por la primera opción.

En este trabajo hemos estudiado cómo el concepto de autonomía biológica nació con la máquina autopoietica de Maturana y Varela, y cómo se desarrolló con aportaciones como el chemoton, el agente autónomo y el sistema autónomo básico. A partir de un planteamiento abstracto y despegado de la naturaleza, el sistema autónomo fue tomando cuerpo en el mundo real, especialmente a partir de consideraciones energéticas. La termodinámica de sistemas abiertos nos condujo a la química, y ésta a la autocatálisis. Autocatálisis y energía se mostraron, por otra parte, inseparables de la membrana.

El estudio de la autonomía biológica, con un enfoque genealógico, nos ha conducido desde los componentes más elementales del universo hasta los seres vivos, a través de autoensamblaje, la autoorganización, el automantenimiento y la infraestructura genética. Los últimos pasos -el mecanismo de la herencia y el desacoplamiento entre el metabolismo y los genes- han permitido incorporar en esta concepción de vida la visión propia de la selección natural.

Hemos visto cómo la explicación de propiedades tan *propias del ser vivo*, como la capacidad funcional y la agencialidad, también puede abordarse como parte del análisis de la vida como autonomía.

Hemos analizado el crecimiento de la complejidad y la estructuración, apoyándonos en una descomposición por pasos, dividiendo –secuenciando- un problema complejo en otros más sencillos y cercanos a la explicación científica. Nos hemos apoyado en la física, la química y la ciencia de la complejidad. El trabajo realizado ha requerido un enfoque sistémico y multidisciplinar.

Los éxitos explicativos de la concepción de vida como autonomía y del análisis genealógico que hemos comentado, han sacado también a la luz procesos que necesitan aclaración y nuevos campos de investigación teórica y experimental. Destacaremos ahora cuatro líneas de trabajo a seguir. Las tres primeras se enmarcan en las etapas clave de nuestro relato –la autoorganización, la autonomía básica y la

capacidad de evolución abierta-, la cuarta línea atiende a la relación entre la definición de vida y las teorías sobre el origen de la vida.

En primer lugar, en el nivel más básico de la evolución prebiótica, queda mucho por explicar de la autoorganización y el automantenimiento en sistemas físicos y químicos. Debe acometerse a partir de la termodinámica de sistemas abiertos y también con el apoyo de simulaciones con ordenador.

Si avanzamos hasta el sistema autónomo básico, es inmediato deducir, a partir del análisis realizado, que el estudio científico de sus componentes –la autocatálisis, los procesos energéticos y la membrana- puede también aportar mucha luz sobre el fenómeno de la vida.

Ya en nuestra etapa final, hemos prestado especial atención a la dificultad que supone la explicación de la capacidad de evolución abierta, como fenómeno natural. Los cuellos de botella a superar para pasar de la autonomía básica a la vida reclaman una investigación amplia y multidisciplinar. Como ejemplo de lo que se puede hacer desde la bioquímica y la genética molecular hemos citado el estudio de los ribosomas, clave del proceso de traducción del código genético y, por tanto, del desacoplamiento entre autocatálisis y registro de información.

Por otra parte, hemos analizado el problema del origen de la vida en relación con la concepción de vida estudiada. La *definición* de vida como autonomía tiene los elementos propios de una *teoría sobre el origen* de la vida. Los descubrimientos sobre cuál *fue el origen* de la vida en la Tierra enriquecen y ponen a prueba lo que es la vida. Y, por su parte, la concepción de vida como autonomía es una guía para la investigación sobre el origen de la vida.

Para terminar, mencionaremos tres ejes clave del problema de la vida que no han sido desarrollados en este trabajo: la vida artificial, la vida fuera de la Tierra y la relación entre vida e información. Los tres pueden beneficiarse de un análisis que parta de la concepción de vida como autonomía.

En primer lugar, no hemos incluido en nuestro análisis, salvo un comentario de dos líneas al final del apartado 15.4, el problema de la vida artificial. La concepción de vida como autonomía que hemos expuesto implica que el ser vivo es un sistema químico. Las investigaciones sobre vida artificial han de dar prioridad a la vida construible a partir de reacciones químicas autocatalíticas. Los trabajos sobre vida artificial *hard* y *soft* son útiles en tanto en cuanto permiten simular el comportamiento de los seres vivos, pero estos sistemas artificiales sólo pueden aspirar a *parecer* vivos.

Tampoco hemos estudiado en este trabajo las investigaciones sobre la vida fuera de la Tierra y su relación con la definición de vida aquí analizada. Las conclusiones que hemos obtenido sobre los elementos constitutivos de la vida en general –autocatálisis química, energía y membrana- sirven de base para la búsqueda de vestigios de vida extraterrestre. Precisar qué hay de contingente y qué de general en la química de la vida en la Tierra facilitaría mucho la tarea. La búsqueda de vida en otros planetas ha de partir de una concepción de vida tan general como sea preciso, pero no más. En este sentido, sería de gran utilidad profundizar en la cuestión de si el carbono es un componente imprescindible de cualquier manifestación de vida. Es una cuestión clave, no sólo por la especificidad de las propiedades químicas que tiene este elemento, sino también por el papel que jugó el carbono como paso obligado para la síntesis de los elementos químicos que le siguen en la tabla periódica<sup>55</sup>.

Por último, la solución al requerimiento de capacidad de evolución abierta –que podemos resumir en dos polímeros y un código- invita a analizar la naturaleza de los seres vivos en términos de los conceptos de información y programa. Al concepto de programa genético se le suelen plantear dos críticas. La primera se refiere al propio concepto de programa. Un programa presupone, en principio, intencionalidad<sup>56</sup>; una propiedad que querríamos evitar en nuestra explicación de los fenómenos biológicos. La segunda crítica se centra en considerar excesiva la importancia que habitualmente se da a la información genética, en detrimento de otros tipos de información presentes en el ser vivo<sup>57</sup>. Las discusiones sobre estos problemas pueden verse beneficiadas de la concepción de vida que hemos analizado. El problema de la intencionalidad podríamos abordarlo partiendo de las consideraciones que hemos hecho en el capítulo 6 sobre funcionalidad y sobre causalidad. En lo que afecta al excesivo peso que suele

---

<sup>55</sup> El carbono forma una gran diversidad de compuestos por enlace covalente con otro(s) carbono(s), con hidrógeno y con elementos no metálicos: N, O, P, S, etc.; así como estructuras por enlace(s) carbono-carbono. Puede establecer enlaces covalentes simples, dobles y triples. La configuración de la última capa de los elementos cercanos al carbono –el boro y el nitrógeno- hace que estos tengan menores posibilidades de unión. El silicio, de igual configuración que el carbono en su capa de valencia, no puede formar dobles o triples enlaces covalentes debido a la repulsión de los electrones internos. Por otra parte, debido al proceso de síntesis de los núcleos atómicos expuesto en el apartado 9.1, en cualquier región del universo –considerado a gran escala- en la que hay átomos más pesados que el carbono, hay también (o hubo) carbono.

<sup>56</sup> Por ejemplo, John Maynard Smith (2000) mantiene que el concepto de información biológica es básicamente intencional; en lugar de un programa escrito por un programador humano tenemos un programa que es resultado de la selección natural.

<sup>57</sup> Marcel Weber (2005), en su estudio del desarrollo de la *Drosophila*, descubre que los biólogos del desarrollo atribuyen información no sólo al ADN, sino también a los gradientes de concentración de determinadas moléculas, establecidos por la madre (en este caso, información posicional).

darse a la información genética, hemos de hacer notar que el problema del uso de información se presenta en el estudio de la autonomía mucho antes de la aparición de polímeros que faciliten un adecuado registro de la misma. Es compatible defender la necesidad de un mecanismo informacional concreto –como el código genético- para conseguir la capacidad de evolución abierta, con la presencia en el sistema autónomo de otros mecanismos de tratamiento de la información. Estos mecanismos deben haber aparecido tempranamente, para favorecer la autoorganización, y seguir presentes cuando el sistema ya se ha convertido en un ser vivo.

## ANEXO

### Infraestructura para la capacidad de evolución abierta

Todos los seres vivos que ha podido estudiar la ciencia basan su mantenimiento y su reproducción en las proteínas y los ácidos nucleicos. Expondremos brevemente su estructura, los mecanismos en los que participan y la funcionalidad que desarrollan.

#### COMPONENTES

Comenzaremos definiendo los componentes más elementales y construiremos los más complejos a partir de ellos.

- El punto de partida de todo lo que sigue está en el átomo de carbono<sup>58</sup>. El átomo de *carbono* presenta características químicas muy específicas que le permiten tanto establecer moléculas muy estables como crear con facilidad cadenas, a partir de componentes más simples.
- Un *grupo funcional* es un átomo o un conjunto de átomos que pueden unirse a una estructura formada por átomos de carbono.
- Un *monómero* es una molécula que puede encadenarse químicamente con otras similares para formar una macromolécula conocida como *polímero*.
- Los *aminoácidos* son moléculas complejas que constan de dos grupos funcionales, un grupo amino y un grupo carboxilo<sup>59</sup>. Los aminoácidos son los monómeros de las proteínas. Hay más de 100 aminoácidos diferentes pero sólo 20 de ellos participan en la construcción de las proteínas.
- Las *proteínas* son polímeros formados por el encadenamiento de aminoácidos.

---

<sup>58</sup> Ningún otro elemento de la tabla periódica ha dado lugar a una química propia de tan amplia potencialidad funcional como la química orgánica del carbono. En este trabajo se ha concluido que no hay vida sin química. Algunos autores, como Pace (2001) defienden que no hay vida sin carbono, pero se trata de un tema abierto a discusión.

<sup>59</sup> Un grupo funcional es un átomo o un conjunto de átomos que confieren a un compuesto orgánico una serie de propiedades específicas. A efectos ilustrativos, el grupo amino tiene fórmula  $-NH_2$ , el carboxilo  $-COOH$ . El detalle químico de los componentes los monómeros excede el objetivo de esta explicación.

- Los *nucleótidos* son moléculas complejas compuestas, a su vez, de tres moléculas diferentes: un grupo fosfato, un azúcar y una base nitrogenada<sup>60</sup>. Los nucleótidos son los monómeros de los ácidos nucleicos (ADN y ARN).
- El *ácido desoxirribonucleico (ADN)* y el *ácido ribonucleico (ARN)* son polímeros formados por el encadenamiento de nucleótidos. En los nucleótidos que forman parte del ADN el azúcar es desoxirribosa, y la base nitrogenada puede ser adenina (A), timina (T), citosina (C) o guanina (G). En los nucleótidos del ARN el azúcar es ribosa y la base nitrogenada puede ser adenina (A), uracilo (U), citosina (C) o guanina (G).
- Un *ribosoma* es una molécula especialmente compleja compuesta de ARN y proteínas.

## ESTRUCTURA DEL ADN E INFORMACIÓN

Cada nucleótido del ADN (o del ARN) está unido al siguiente por el enlace entre un grupo fosfato y un azúcar. Estos enlaces constituyen la estructura de soporte que mantiene la cadena unida. Los nucleótidos sólo se diferencian entre sí en la base nitrogenada que incluyen. Por eso podemos denominar un nucleótido con sólo nombrar su base o, más fácil, la letra que la representa: A, T, C o G (o A, U, C o G).

El ADN es la estructura que mantiene la información hereditaria. Podemos visualizar dicha información como una cadena de letras del alfabeto formado por A, T, C y G. El orden de las letras constituye la información registrada.

## DOBLE HÉLICE Y REPLICACIÓN

El ADN se presenta en pares de hebras (cadenas) complementarias entrelazadas. Cada nucleótido de una hebra se une con un nucleótido de la otra por medio de un enlace químico entre sus respectivas bases. Cada base sólo pueden unirse a su complementaria (C con G, A con T). Debido a esta restricción, la estructura de doble hélice no aporta información adicional (la información almacenada por una hebra es equivalente a la de su complementaria), pero es la solución estructural en la que se basa la replicación. Cuando va a realizarse la división celular, las dos hebras de ADN se separan, y cada una de ellas sirve de plantilla para generar otra hebra complementaria. De este modo, a partir de una doble hélice se producen dos iguales;

---

<sup>60</sup> No interesa aquí tanto el detalle de los grupos moleculares que se citan como saber que tienen composiciones y estructuras moleculares bien definidas, lo que les hace adecuados para servir como bloques a partir de los que construir moléculas más complejas, en este caso, nucleótidos.

cada una de ellas replicará la información original de la célula padre en una de las dos células hijas.

## CÓDIGO GENÉTICO

El alfabeto de los ácidos nucleicos tiene 4 signos, correspondientes a cuatro bases: A, C, G y T (o A, C, G y U). En una cadena de ADN, cada conjunto de tres letras consecutivas (tres bases) forma un *codón*, un signo de un nuevo alfabeto, que codifica un aminoácido o el inicio o final de la cadena de los aminoácidos que forman parte de una proteína. Debido a esto, el alfabeto de las proteínas tiene  $4^3 = 64$  signos, que corresponde al número de posibles de tríos de letras. Esta codificación es redundante: 61 signos codifican 20 aminoácidos y 3 corresponden a signos de puntuación. El código genético es el conjunto de reglas que define el paso de una secuencia de nucleótidos a una secuencia de aminoácidos<sup>61</sup>.

## TRANSCRIPCIÓN, TRADUCCIÓN Y SÍNTESIS DE PROTEÍNAS

El mecanismo que da lugar a la síntesis de proteínas consta de los siguientes pasos.

En primer lugar, una porción del código almacenado en el ADN *se transcribe* en una cadena de ARN. En este proceso, una enzima llamada ARN polimerasa, tomando como plantilla una secuencia de ADN, facilita la síntesis de una cadena de ARN. Lo ocurrido en la transcripción requiere tres explicaciones complementarias: (i) un conjunto de nucleótidos se han unido formando un ácido nucleico, (ii) se ha mantenido la información que contenía el ADN, ya que el orden de los nucleótidos en el ARN sintetizado viene determinado por el orden que tenían los nucleótidos en el ADN, y (iii) se ha realizado un cambio de formato: se ha obtenido una copia simple (una cadena) en *formato ARN* de un original doble (dos cadenas) en *formato ADN*.

A continuación, el ARN obtenido, que hace de mensajero (ARNm), viaja hasta un ribosoma llevando consigo la información genética a traducir. Otro tipo de ARN, el ARN de transferencia, proporciona los aminoácidos necesarios para la síntesis de las proteínas.

---

<sup>61</sup> Este sistema de codificación y traducción, partiendo de un primer alfabeto, muy simple, permite generar una diversidad de mensajes inmensa. Téngase en cuenta que una proteína puede tener una longitud de decenas o centenares de aminoácidos. Si consideramos, por ejemplo, las proteínas de longitud 200 (200 aminoácidos encadenados), el número de ellas distintas que pueden formarse es  $20^{200}$ . Según los cálculos de Kauffman (2000), desde el origen del universo no ha habido tiempo suficiente para que se creen todas las proteínas de longitud 200.

Los ribosomas son estructuras moleculares complejas que constan de ARN y proteínas. Un ribosoma puede verse como una máquina que produce –sintetiza- proteínas a partir de aminoácidos y de la información codificada en el ARNm. El orden que han de mantener los aminoácidos en la cadena de salida –la proteína- viene especificado en el ARNm.

En el proceso realizado por el ribosoma se ha realizado una síntesis de proteínas, pero también una traducción. La cadena de ARNm que entra en el ribosoma expresa un mensaje en el alfabeto de los ácidos nucleicos, y la proteína saliente corresponde a otro mensaje, esta vez en el alfabeto de las proteínas. La traducción se realiza aplicando el código genético, que es el conjunto de reglas que define el paso de una secuencia de nucleótidos en el ARNm a una secuencia de aminoácidos en una proteína.

## PROTEÍNAS Y ÁCIDOS NUCLEICOS

Las proteínas son las biomoléculas más versátiles y diversas. Participan en la práctica totalidad de los procesos celulares y son imprescindibles para el mantenimiento y el crecimiento del organismo. Realizan funciones muy diversas, destacando –por lo que ahora nos ocupa- sus funciones estructurales y catalizadoras.

Los ácidos nucleicos constituyen el soporte químico que requieren el almacenamiento y la transmisión fiables de la información compleja que necesita la vida.

Los ácidos nucleicos y las proteínas constituyen la infraestructura que permite el desacoplamiento –y la interrelación- entre el metabolismo y la replicación; la infraestructura que proporciona al ser vivo actual su capacidad de evolución abierta.

## REFERENCIAS

- Bechtel, W. (2007). Biological mechanism: organized to maintain autonomy. *Systems Biology: Philosophical Foundations*, cap. 12, Elsevier B. V.
- Bedau, M. A, y Cleland, C. E. (2010). The Nature of life: Classical and contemporary perspectives from philosophy and science. *Cambridge University Press*.
- Bickhard, M. (2000). "Autonomy, function and representation. Communication and cognition – Artificial intelligence". *Communication and cognition – Artificial intelligence* (Special issue on: The contribution of artificial life and the sciences of complexity to the understanding of autonomous systems. Guest editors: Arantxa Etxebarria, Álvaro Moreno, Jon Umérez) 17(3-4) pp. 111-131.
- Cleland, C. E, y Chyba, C. (2007). Does "life" have a definition? *En Bedau, M. A, y Cleland, C. E. (2010)*. Aparición original en Woodruff T. Sullivan III y John A. Baross (Eds.). *Planets and life: the emerging science of astrobiology*, pp. 119-13. *Cambridge University Press, 2007*.
- Dyson, F., J. (1999). Los orígenes de la vida. *Cambridge University Press*.
- Etxebarria, A. y Moreno, A. (2007). La idea de autonomía en biología. *LOGOS Anales del Seminario de Metafísica*, 40: 21-37.
- Fry, I. (1995). Are the different hypothesis on the emergence of life as different as they seen? *En Bedau, M. A, y Cleland, C. E. (2010)*. Aparición original en *Biology and Philosophy* 10(4) (1995), 398-417.
- Fry, I. (2000). The emergence of life on Earth. *Routledge University Press*.
- Fry, I. (2010) The role of natural selection in the origin of life. *Springer*.
- Halley, J. D. y Winkler, D. A. (2008). Consistent concepts of self-organization and self-assembly. *Wiley on-line. Complexity*, vol. 14, n. 2, pp. 10-17.
- Gánti, T. (2003). The principles of life. *New York, Oxford*.
- Kauffman, S. (2000). Investigaciones. *Tusquets Metatemas, 2003. Edición original en inglés 2000*.
- Luisi, L. (2013). Qué es la vida una visión sistémica. *SEBBM, 175, marzo 2013*.

- Maynard Smith, J. (2000). The Concept of Information in Biology. *Philosophy of Science* 67: 177-94.
- Maturana, H. y Varela, F. J. (1973). De máquinas y seres vivos: una teoría sobre la organización biológica. *Editorial Universitaria S. A. Santiago de Chile*.
- Mayr, E. (2004). Por qué es única la biología. *Katz, 2006. Edición original en inglés 2004*.
- Moreno, A. (2007). A systemic approach to the origin of biological organization. *Systems Biology: Philosophical Foundations, cap. 11, Elsevier B. V.*
- Pace, N. R. (2001). The universal nature of biochemistry. *En Bedau, M. A, y Cleland, C. E. (2010). Aparición original en Proceedings of the National Academy of Sciences* 98(3) (2001), 805-808.
- Prigogine, I. y Stengers, I. (1979) La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia. *Alianza Editorial, 2002. Edición original 1979*.
- Ruiz-Mirazo, K. y Moreno, A. (2004). Basic autonomy as a fundamental step in the synthesis of life. *Artificial Life, 10: 235-259*.
- Ruiz-Mirazo, K., Peretó, J. y Moreno, A. (2004). A universal definition of life: autonomy and open-ended evolution. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere, 34: 323-346*.
- Ruiz-Mirazo, K. y Moreno, A. (2011). Autonomy in evolution: from minimal to complex life. *Springer*.
- Sagan, C. (1970), Life. *The Encyclopaedia Britannica*.
- Schneider, E. D. y Sagan, D. (2005). La termodinámica de la vida. *Tusquets Metatemas, 2009. Edición original 2005*.
- Schneider, E. D. y Kay, J. J. (1994). Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. *Pergamon. Math. Comput. Modeling, vol. 19, n. 6-8, pp. 25-48*.
- Schrödinger, E. (1944). ¿Qué es la vida? *Tusquets Metatemas, 2011. Edición original 1944*.
- Varela, F. J. (1979). Principles of biological autonomy. *Elsevier, New York*.
- Weber, A. y Varela, F. (2002). Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality. *Phenomenology and cognitive sciences* 2: 97-105.

- Weber, M. (2005). *Philosophy of Experimental Biology*. Cambridge University Press.
- Weinberg, S. (1977). *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. New York: Basic Books, Inc., Publishers.
- Wicken, J. (1987). *Evolution, thermodynamics and information: Extending the Darwinian program*. Oxford University Press, New York.