ORDEN SOBRE EL CAOS

La Madurez del Universo

La gran hipótesis de una evolución cósmica de la información

Chicote CFC
Cronista Visual - Ensayista



Sinopsis Editorial

¿Es el orden lo contrario del caos o una de las formas que el universo desarrolla en su evolución a través de él? Partiendo de este problema epistemológico central, Orden sobre el Caos: La Madurez del Universo explora la profunda relación funcional entre tres dimensiones clave de la realidad: la energía, la información y la organización.

A través de una secuencia rigurosamente argumentada, el autor analiza cómo las leyes físicas no solo imponen restricciones termodinámicas, sino que permiten la emergencia de sistemas abiertos capaces de conservar diferencias físicamente realizables. Desde los conceptos de prememoria y persistencia física, el libro nos guía por la frontera donde la materia inerte da paso a la autorregulación celular y la herencia biológica.

El ensayo profundiza en cómo la acumulación histórica de información trasciende la mera reacción para dar paso a la anticipación y a la inteligencia entendida como organizadora de la energía. Con la aparición del aprendizaje, la cultura y la tecnología, la información logra externalizarse del organismo biológico hacia nuevos soportes materiales, abriendo un interrogante de alcance astrobiológico y cosmológico: ¿somos una singularidad irrepetible o representamos una fase potencialmente recurrente en la evolución de la materia organizada?

Lejos de dogmatismos o teleologías gratuitas, Chicote CFC nos ofrece una hipótesis cauta y conceptualmente sólida: el universo no necesita perseguir una finalidad para que la conservación de la historia se convierta en una capacidad activa sobre el futuro.

I.S.B.N.: 978-84-09-92137-9



I.S.B.N.: 978-84-09-92433-2



La Madurez del Universo

La Evolución Cósmica de la Información

"Ensayo y marco teórico de cómo la información impulsó y transformó los ciclos evolutivos"

Edición, diseño y publicación por Chicote CFC
Año 2026 - Primera Edición

Queda estrictamente prohibido, bajo las sanciones
establecidas por la ley, reproducir, registrar
o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente,
por cualquier sistema de recuperación
y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico,
magnético, electroóptico, por fotocopia
o cualquier otro tipo de soporte, sin la autorización
expresa de los titulares del copyright.

ORDEN SOBRE EL CAOS

La Madurez del Universo

La gran hipótesis de una evolución cósmica de la información

Chicote CFC

Creador del Simbiosismo / Arte Simbiótico

NOTA DEL AUTOR

Este ensayo nace de una convicción personal y de muchos años de reflexión sobre una pregunta que probablemente no pueda responderse de forma definitiva: ¿cómo puede un universo en permanente transformación llegar a generar sistemas capaces de conservar información, organizar sus propias transformaciones y, a través de la acumulación de esa historia, dar lugar a la vida, la anticipación y la inteligencia?

No pretende sustituir las teorías consolidadas de la física, la termodinámica, la biología evolutiva o las ciencias de la vida, ni presentarse como una demostración concluyente de un proceso cósmico determinado. Su propósito es diferente: explorar, desde una perspectiva transdisciplinar, si puede existir una relación más profunda entre energía, información y organización que ayude a comprender cómo determinadas formas de materia llegan a adquirir la capacidad de conservar las consecuencias de sus transformaciones y utilizarlas para modificar sus estados posteriores.

Las ideas aquí expuestas constituyen una hipótesis integradora. Algunas parten de conocimientos científicos establecidos; otras son interpretaciones y conexiones conceptuales que propongo como parte de una investigación abierta. Conceptos como la persistencia o la acumulación de información se utilizan en este ensayo para construir un marco de análisis, mientras que otros, como la prememoria, pertenecen expresamente a la terminología conceptual desarrollada para esta propuesta. Soy consciente de que estas ideas pueden ser discutidas, matizadas o incluso refutadas. Lejos de considerar esa posibilidad un fracaso, la entiendo como una condición necesaria de cualquier planteamiento que aspire a formar parte del proceso de construcción del conocimiento.

El propósito de este libro no es demostrar que el universo tenga una finalidad, que la materia tienda inevitablemente hacia una mayor organización o que la inteligencia constituya el destino de la evolución. La cuestión es más abierta: determinar hasta qué punto puede hablarse de una continuidad funcional entre transformación, persistencia, información, organización y vida, y si determinados sistemas físicos pueden adquirir, bajo ciertas condiciones, una capacidad creciente para conservar su historia y utilizarla en la transformación de su futuro.
Si estas páginas consiguen suscitar nuevas preguntas, estimular investigaciones posteriores o servir como punto de partida para que otros desarrollen, corrijan, cuestionen o amplíen este planteamiento mediante herramientas científicas más precisas, este trabajo habrá cumplido plenamente su propósito.

Después de todo, quizá el conocimiento no avance únicamente cuando encuentra respuestas, sino también cuando consigue formular con mayor precisión aquello que todavía no sabemos.

INDICE

PREÁMBULO
El problema epistemológico de la energía y la información 9

CAPÍTULO I
Energía, entropía y orden 13

CAPÍTULO II
La información como propiedad física 19

CAPÍTULO III
La persistencia: cuando el pasado comienza a intervenir en el futuro 25

CAPÍTULO IV
La célula y el nacimiento de la autorregulación 31

CAPÍTULO V
De la reacción a la anticipación 37

CAPÍTULO VI
La acumulación: cuando la información comienza a construir historia 45

CAPÍTULO VII
La inteligencia como organizadora de energía 55

CAPÍTULO VIII
¿Somos una excepción o una fase? 63

CAPÍTULO IX
El futuro cósmico: información, energía y organización 71

CAPÍTULO X
La gran hipótesis: ¿una evolución cósmica de la información? 81

CAPÍTULO XI
La última pregunta 91

CONCLUSIÓN
El proceso continúa 99

PREÁMBULO

El problema epistemológico de la energía y la información

Nuestro conocimiento del universo está condicionado por nuestra capacidad para observarlo, medirlo e interpretarlo. Las leyes físicas que utilizamos constituyen modelos extraordinariamente eficaces para describir una parte de los fenómenos que podemos estudiar, pero la historia de la ciencia muestra que ningún modelo debe confundirse definitivamente con la totalidad de lo real. Observamos el universo desde dentro de él, mediante instrumentos construidos con la misma materia que pretendemos comprender, y nuestras explicaciones están necesariamente condicionadas por el alcance de nuestras herramientas, por nuestras categorías conceptuales y por aquello que todavía no somos capaces de detectar.

La física ha construido una descripción extraordinariamente precisa de la materia, la energía, el espacio, el tiempo y las transformaciones que los relacionan. La termodinámica, en particular, nos muestra que las transformaciones energéticas no son indiferentes a las condiciones en las que se producen y que, en un sistema aislado, la entropía no disminuye espontáneamente. Sin embargo, esta descripción no significa que toda organización local esté prohibida. Existen sistemas alejados del equilibrio capaces de generar y mantener estructuras organizadas mediante el intercambio de materia y energía con su entorno. El estudio de estas estructuras disipativas, desarrollado de manera fundamental por Ilya Prigogine, mostró que el alejamiento del equilibrio puede convertirse precisamente en una condición para la aparición de determinadas formas de organización. [1]

La biología introduce en este escenario una dimensión adicional: la capacidad de determinados sistemas materiales para conservar información sobre su propia organización, reproducirla y utilizarla en su mantenimiento. Pero la palabra información exige aquí una precisión. En el ámbito científico moderno dejó de ser únicamente una noción vinculada al conocimiento o al significado y adquirió una formulación matemática rigurosa con la teoría de la información desarrollada por Claude Shannon, quien la relacionó con la incertidumbre y la transmisión de señales. [2] Esta formulación no implica que toda información posea significado ni que la información sea una sustancia independiente de la materia; establece, en cambio, que las diferencias entre estados pueden ser descritas y cuantificadas dentro de determinados procesos físicos y comunicativos.

Esta cuestión adquiere una profundidad mayor cuando se considera que la información no puede existir físicamente al margen de algún soporte. Rolf Landauer mostró que las operaciones informacionales tienen una realización física y que determinados procesos de manipulación de información están sometidos a restricciones termodinámicas. Su principio sobre el borrado irreversible de información estableció una relación cuantitativa entre información y disipación de energía, posteriormente comprobada experimentalmente. [3] Esto no significa que información y energía sean equivalentes. Son conceptos distintos. Significa que cualquier sistema físico capaz de almacenar, transmitir o procesar información debe hacerlo mediante estados materiales o energéticos sometidos a las leyes físicas.

Esta relación entre física, organización e información ya había sido planteada, desde otra perspectiva, por Erwin Schrödinger en What Is Life?, donde abordó el problema de cómo los organismos pueden mantener su organización dentro de un universo regido por las leyes de la termodinámica y examinó la naturaleza física de la herencia. Su reflexión contribuyó históricamente a situar el problema de la vida dentro de un marco físico y molecular. [4]

A partir de aquí surge una cuestión que va más allá de describir por separado estos fenómenos. El universo no parece estar constituido únicamente por transformaciones energéticas aisladas, sino también por estructuras capaces de conservar determinadas diferencias, establecer relaciones entre estados y mantener formas de organización durante períodos muy diferentes. Las estrellas, las moléculas, los sistemas planetarios, las redes químicas y los organismos presentan grados y formas de organización radicalmente distintos, pero todos ellos son configuraciones físicas sometidas a procesos de transformación.

La vida representa, hasta donde sabemos, una manifestación especialmente compleja de esta capacidad. Un organismo no se limita a intercambiar energía y materia con su entorno: utiliza información para conservar una organización que, de otro modo, tendería a desaparecer. La célula mantiene gradientes, regula procesos, repara estructuras, reproduce determinadas configuraciones y responde a variaciones ambientales. No es necesario atribuirle conciencia ni finalidad para reconocer que existe en ella una capacidad de regulación extraordinariamente eficaz.

La cuestión que se plantea entonces es si la información debe entenderse únicamente como un producto de los sistemas vivos o si, por el contrario, puede constituir una dimensión más profunda de determinados procesos

físicos. No se trataría de considerar la información como una sustancia oculta ni como una forma de energía, sino de preguntarnos si determinados sistemas energéticos pueden adquirir, mediante la conservación y utilización de diferencias físicamente realizables, una capacidad creciente para mantener su organización y dirigir sus propias transformaciones.

Esta posibilidad no contradice por sí misma la segunda ley de la termodinámica. Un sistema abierto puede mantener o incrementar su organización interna mientras intercambia energía y materia con el entorno y aumenta la entropía total del conjunto. La cuestión interesante no es, por tanto, cómo podría la vida escapar de la entropía, sino qué condiciones físicas permiten que determinados sistemas, mientras disipan energía, desarrollen estructuras capaces de conservar información, regular sus procesos y modificar las condiciones de su propia persistencia.

Si esta relación existiera, la vida podría dejar de interpretarse únicamente como una excepción extraordinaria dentro de la historia del universo y comenzar a contemplarse como una de las formas posibles mediante las cuales la materia organizada utiliza información para conservarse y transformarse. La inteligencia, aparecida mucho después en la historia biológica, añadiría una capacidad nueva: utilizar información no solo para conservar el presente, sino para representar posibilidades futuras y modificar deliberadamente las transformaciones que todavía no han ocurrido.

Esta perspectiva obliga también a reconsiderar nuestra posición dentro de esa historia. La inteligencia humana ha conseguido almacenar información fuera del organismo, transmitirla entre generaciones, convertirla en conocimiento y materializarla en herramientas y sistemas tecnológicos capaces de intervenir sobre cantidades de energía que ningún individuo podría controlar directamente. Pero nada permite afirmar que este proceso tenga que continuar indefinidamente ni que la humanidad constituya su culminación.

La hipótesis que recorrerá este ensayo es, por tanto, deliberadamente abierta: quizá exista una relación profunda entre energía, persistencia, información y organización que, bajo determinadas condiciones, permita la aparición progresiva de sistemas capaces de conservar más información, procesarla con mayor eficacia y utilizarla para organizar sus propias transformaciones. Si esa relación fuera algo más que una particularidad de la vida terrestre, la aparición de la vida y de la inteligencia podría representar no un destino del universo, sino una de las posibilidades que determinadas condiciones físicas hacen emerger.

La pregunta fundamental no será entonces si el universo tiene una finalidad, ni si pretende producir vida o inteligencia. No necesitamos atribuirle voluntad alguna. La pregunta será mucho más concreta y, al mismo tiempo, más difícil: ¿podrían las propias leyes físicas permitir que, en determinadas condiciones, la materia pase de limitarse a transformarse a conservar parte de su historia, utilizar esa información para regularse y, finalmente, emplearla para organizar de manera cada vez más compleja sus relaciones con la energía?

De esta pregunta parte la investigación que sigue.

¿Podría el orden no ser lo contrario del caos, sino una de las formas que el universo desarrolla en su evolución a través de él?

Referencias al preámbulo

[1] Ilya Prigogine, The Nobel Lecture: Time, Structure and Fluctuations, Nobel Lecture, 1977. Contribuciones a la termodinámica del no equilibrio y a la teoría de las estructuras disipativas.
[2] Claude E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", Bell System Technical Journal, vol. 27, 1948, pp. 379–423 y 623–656.
[3] Rolf Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process", IBM Journal of Research and Development, vol. 5, 1961, pp. 183–191. El principio de Landauer establece un coste termodinámico mínimo para el borrado lógico irreversible de información.
[4] Erwin Schrödinger, What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell, Cambridge University Press, 1944.

CAPITULO I

Energía, Entropía y Orden

La energía constituye uno de los conceptos fundamentales de la física, pero no debe entenderse como una sustancia que pueda almacenarse siempre de la misma manera o utilizarse indistintamente para cualquier propósito. La primera ley de la termodinámica establece su conservación: la energía no aparece de la nada ni desaparece sin más, sino que se transforma. Sin embargo, la termodinámica introduce una segunda restricción decisiva: esas transformaciones no son todas equivalentes desde el punto de vista de su capacidad para producir trabajo. La dirección de los procesos espontáneos y la distribución de la energía están condicionadas por la entropía. La segunda ley establece, en términos generales, que la entropía total de un sistema cerrado y, en particular, del universo considerado como totalidad, no disminuye espontáneamente.

La entropía, sin embargo, no debería identificarse sin más con el concepto cotidiano de caos. Esa equivalencia puede resultar intuitiva, pero es demasiado limitada para describir su significado físico. En la formulación estadística, la entropía está relacionada con el número de configuraciones microscópicas compatibles con un determinado estado macroscópico. Desde esta perspectiva, lo que denominamos desorden puede entenderse mejor como una mayor multiplicidad de configuraciones posibles. La termodinámica no afirma simplemente que todo deba hacerse progresivamente más caótico; establece una dirección estadística para determinados procesos irreversibles y una restricción sobre las transformaciones espontáneas.

Esta precisión resulta esencial porque, si la entropía se interpreta exclusivamente como destrucción de cualquier forma de orden, surge inmediatamente una aparente contradicción: ¿cómo pueden existir estructuras organizadas en un universo sometido a la segunda ley? La respuesta comienza por distinguir entre un sistema considerado aisladamente y un sistema que intercambia energía o materia con su entorno. Una región determinada puede aumentar su organización o disminuir su entropía a costa de producir un incremento mayor de entropía en el entorno. La segunda ley no prohíbe, por tanto, la aparición de orden local; exige que el balance termodinámico global sea compatible con el aumento de entropía.

La vida constituye uno de los ejemplos más evidentes de esta situación, pero no es necesario llegar todavía a ella. Una llama, una corriente convectiva, determinadas reacciones químicas o una estructura mantenida por un flujo

continuo de materia y energía pueden presentar organización sin encontrarse en equilibrio. Son configuraciones que existen precisamente porque existe un intercambio con el exterior. Cuando ese intercambio desaparece, la estructura puede desaparecer con él.

Este fenómeno adquirió una importancia particular con el desarrollo de la termodinámica del no equilibrio. Ilya Prigogine mostró que determinados sistemas alejados del equilibrio pueden generar y mantener estructuras ordenadas mediante procesos irreversibles. A estas configuraciones las denominó estructuras disipativas, subrayando que su existencia depende precisamente de los intercambios con el entorno. Por sus contribuciones a la termodinámica del no equilibrio, y particularmente por la teoría de las estructuras disipativas, Prigogine recibió el Premio Nobel de Química en 1977.

El significado de esta aportación es profundo. La disipación de energía, que desde una perspectiva simplificada podría parecer únicamente una pérdida de capacidad para realizar trabajo, puede participar en la generación y mantenimiento de determinadas formas de organización. Lejos del equilibrio, los flujos pueden producir inestabilidades, fluctuaciones y nuevas configuraciones colectivas. La organización no aparece entonces como una negación de la termodinámica, sino como uno de los comportamientos que pueden surgir bajo determinadas condiciones termodinámicas.

Esto obliga a modificar una oposición demasiado sencilla entre orden y entropía. El orden no constituye necesariamente lo contrario de la entropía, ni toda organización requiere una disminución de la entropía total. Una estructura puede mantenerse precisamente porque disipa energía y expulsa entropía al entorno. En los sistemas abiertos, el mantenimiento de un estado organizado requiere un intercambio continuo con el exterior; la organización no es una propiedad estática, sino una condición dinámica que debe ser sostenida mediante transformaciones.

Aquí aparece una primera cuestión relevante para nuestra investigación. Si determinadas configuraciones organizadas pueden surgir y mantenerse gracias al flujo de energía a través de sistemas alejados del equilibrio, debemos preguntarnos qué diferencia a una estructura que simplemente existe durante un tiempo de otra capaz de conservar su organización, reproducir determinados estados y modificar activamente las condiciones que la rodean.
La diferencia no parece encontrarse únicamente en la cantidad de energía disponible. Dos sistemas pueden disponer de energía y, sin embargo, utilizarla de maneras completamente diferentes. Lo decisivo puede estar relacionado con la forma en que esa energía se distribuye, con los gradientes existentes y, sobre todo, con las relaciones internas que permiten que un sistema responda de manera determinada a las transformaciones que experimenta.

Una estrella, una reacción química, un cristal, una célula y una sociedad humana son sistemas radicalmente diferentes. Todos están sometidos a las mismas leyes físicas fundamentales, pero sus capacidades para conservar estructuras, responder a perturbaciones y modificar su relación con el entorno son extraordinariamente distintas. La cuestión, por tanto, no consiste en afirmar que todos ellos posean la misma clase de organización, sino en preguntarnos si existe una continuidad funcional entre determinadas formas de organización física que permita comprender cómo aparecen progresivamente sistemas capaces de conservar y utilizar información.

En este punto, la energía deja de ser considerada únicamente como aquello que hace posibles las transformaciones y comienza a adquirir otra dimensión dentro de nuestro problema: constituye el flujo que atraviesa los sistemas y permite que determinadas relaciones materiales se mantengan activas. La organización, por su parte, determina cómo se articulan esas transformaciones. Entre ambas aparece una tercera dimensión que todavía no hemos examinado suficientemente: la capacidad de un sistema para conservar diferencias entre estados y hacer que esas diferencias tengan consecuencias sobre transformaciones posteriores.

Una molécula que mantiene una configuración estable, un cristal que conserva una estructura, una reacción química que deja productos capaces de modificar las reacciones posteriores o una célula que conserva información hereditaria presentan fenómenos muy diferentes, pero todos contienen, en grados distintos, una característica que será fundamental para nuestra investigación: el estado presente no depende únicamente de las condiciones actuales, sino también de lo que ha ocurrido anteriormente.

Esta dependencia introduce algo más que organización espacial. Introduce historia.

Si un sistema puede conservar una configuración durante un intervalo determinado y esa configuración condiciona las transformaciones posteriores, entonces el pasado deja de ser completamente irrelevante para el futuro del sistema. La persistencia se convierte así en una condición previa para cualquier forma de acumulación de información. Antes de que exista memoria biológica, representación mental o conciencia, debe existir la posibilidad física de que determinadas diferencias sobrevivan a las transformaciones y continúen teniendo efectos.

No afirmamos con ello que toda persistencia constituya información en sentido pleno. Una estructura puede simplemente permanecer estable sin que exista ningún proceso que utilice esa estabilidad. La diferencia fundamental aparecerá

cuando un sistema no solo conserve determinadas configuraciones, sino que pueda aprovecharlas para regular sus transformaciones posteriores.

Esta distinción será decisiva. La estabilidad física puede existir sin vida; la organización puede existir sin información funcional; y la información, en sentido físico, necesita un soporte capaz de conservar diferencias. La cuestión que nos interesa es si, bajo determinadas condiciones, estas propiedades pueden integrarse en sistemas progresivamente capaces de utilizar su propia historia para mantenerse y transformarse.

Desde esta perspectiva, el problema del origen de la vida puede contemplarse desde una pregunta ligeramente diferente. En lugar de preguntarnos únicamente cómo apareció la primera célula, podemos preguntarnos qué condiciones físicas hicieron posible que una organización material llegara a conservar información sobre sí misma, utilizarla para regular sus procesos y transmitir parte de esa organización hacia el futuro.

Esta formulación no pretende sustituir las investigaciones existentes sobre el origen de la vida. Pretende situarlas dentro de una cuestión más amplia: cómo determinadas transformaciones energéticas pueden dar lugar a sistemas capaces de mantener organización frente a las perturbaciones que tienden a modificarla.

La termodinámica proporciona aquí el marco que no podemos abandonar. Ningún sistema vivo, tecnológico o cognitivo puede escapar de sus restricciones. Toda organización requiere transformaciones, todo procesamiento físico requiere recursos y todo mantenimiento estructural tiene un coste. La aparición de organización no supone una excepción a las leyes físicas, sino una forma particular de utilizarlas bajo determinadas condiciones.

La cuestión que comienza a emerger es, por tanto, más precisa que la oposición entre orden y caos. No se trata de saber si el universo tiende al orden, afirmación que iría mucho más allá de lo que permite establecer la termodinámica. Se trata de investigar si existen condiciones en las que los flujos de energía favorezcan la aparición de estructuras capaces de conservar diferencias, y si algunas de esas estructuras pueden convertir esa persistencia en una capacidad creciente para organizar sus propias transformaciones.

Esta última afirmación pertenece ya al terreno de la hipótesis. La física nos proporciona el hecho de que pueden aparecer estructuras organizadas lejos del equilibrio; la termodinámica nos proporciona las restricciones bajo las cuales pueden mantenerse; pero la posibilidad de que la conservación y utilización de información constituya un factor progresivamente relevante en esa organización

es una cuestión que tendremos que desarrollar a través de la biología, la teoría de la información y el estudio de los sistemas vivos.

El primer paso consiste, por tanto, en comprender qué significa realmente conservar información en un universo sometido a una transformación permanente. Ese será el problema del capítulo siguiente.

Referencias al capítulo I

[1] Paul Peter Urone y Roger Hinrichs, University Physics Volume 2, OpenStax, cap. 4, especialmente las secciones sobre segunda ley y entropía. OpenStax
[2] Ilya Prigogine, Time, Structure and Fluctuations, Nobel Lecture, 1977. Premio Nobel
[3] Ilya Prigogine, Nobel Prize in Chemistry 1977, por sus contribuciones a la termodinámica del no equilibrio, particularmente la teoría de las estructuras disipativas. Premio Nobel
[4] Revisión sobre termodinámica de no equilibrio en sistemas bioquímicos y condiciones para la aparición de estructuras disipativas en sistemas abiertos.

CAPITULO II

La Información Como Propiedad Física

Hablar de información parece, a primera vista, exigir la existencia de alguien que observe, interprete o comprenda aquello que recibe. Durante mucho tiempo, además, la palabra estuvo asociada principalmente al conocimiento, al lenguaje o a la comunicación humana. Sin embargo, la física y las ciencias de la información han demostrado que puede formularse un concepto de información que no depende de la existencia de un significado consciente. Claude Shannon estableció en 1948 una formulación matemática de la información vinculada a la incertidumbre y a la transmisión de mensajes, separando el problema técnico de la comunicación de la cuestión semántica de su significado. [1]

Esta distinción resulta fundamental para la investigación que aquí se plantea. Una cosa es la información como contenido interpretado por una mente y otra la información como diferencia entre estados que puede ser registrada, transmitida o utilizada dentro de un proceso. Un código genético, por ejemplo, posee una configuración física concreta y participa en procesos biológicos determinados sin que sea necesario atribuirle conocimiento o conciencia. La información biológica no comenzó con el sistema nervioso ni con la aparición de un organismo capaz de reflexionar sobre ella. Mucho antes de que existieran cerebros, ya existían estructuras materiales capaces de conservar diferencias y transmitirlas.

Esto obliga, sin embargo, a evitar una definición excesivamente amplia. Si toda diferencia física existente en el universo fuera considerada automáticamente información, el concepto perdería buena parte de su capacidad explicativa. Una montaña sería información, una piedra sería información, cada variación microscópica de temperatura sería información y cualquier configuración material constituiría, por el mero hecho de existir, una cantidad indefinida de información. Una definición semejante podría ser matemáticamente posible bajo determinados marcos, pero resultaría poco útil para la cuestión que nos ocupa.

Por ello, en este ensayo utilizaremos provisionalmente una formulación funcional: consideraremos información una diferencia físicamente distinguible que pueda ser conservada, transmitida o utilizada dentro de un proceso. No se trata de proponer una nueva definición científica de la información, sino de establecer un criterio operativo para nuestra investigación. Lo que nos interesa no es cualquier diferencia existente, sino aquellas diferencias que adquieren capacidad para intervenir en transformaciones posteriores.

Esta definición permite separar tres conceptos que con frecuencia se confunden: información, significado y conocimiento. Una secuencia genética puede contener información funcional sin poseer significado en el sentido humano del término. Una señal puede transmitir información sin que exista comprensión consciente de ella. Y el conocimiento supone todavía un nivel diferente: implica la integración de información dentro de un sistema capaz de relacionarla, interpretarla y utilizarla de determinada manera. La información, por tanto, no necesita comenzar con la conciencia.

Esta separación resulta especialmente importante cuando trasladamos la cuestión al mundo físico. Si una configuración material puede distinguirse de otra, conservarse durante un determinado intervalo y producir consecuencias diferentes en las transformaciones posteriores, entonces la historia del sistema adquiere relevancia física. El estado presente no depende únicamente de las condiciones actuales, sino también de determinadas diferencias que han sobrevivido a transformaciones anteriores.

Aquí aparece una relación directa con el problema planteado en el capítulo anterior. La persistencia constituye una condición necesaria para que una diferencia pueda adquirir continuidad. Una diferencia que desaparece inmediatamente no puede ser conservada ni utilizada posteriormente. La información requiere, por tanto, algún tipo de soporte físico capaz de mantenerla, aunque sea temporalmente, y de permitir que pueda ser recuperada, transmitida o transformada.

Esto no significa que la información sea una sustancia material independiente. No existe una materia llamada información que pueda encontrarse separada de los sistemas que la contienen. Una misma información puede adoptar soportes físicos completamente diferentes: puede estar representada mediante una configuración molecular, una secuencia genética, una señal eléctrica, una modificación magnética, una inscripción sobre una superficie o una determinada configuración de estados de un sistema de cómputo. Lo que permanece no es necesariamente el soporte concreto, sino una relación o configuración que puede ser reproducida mediante otro soporte.

La posibilidad de que la información cambie de soporte resulta especialmente importante para comprender la evolución de los sistemas vivos. Una configuración hereditaria puede reproducirse de una generación a otra y, con ello, mantener determinadas relaciones organizativas más allá de la existencia individual del organismo que las contiene. La información puede así superar la duración de su soporte concreto mediante procesos de copia y transmisión. El organismo muere, pero determinadas configuraciones pueden continuar presentes en sus descendientes.

La evolución biológica convierte esta propiedad en un proceso histórico. Las variaciones que afectan a la organización de los organismos pueden transmitirse, conservarse o desaparecer en generaciones sucesivas. No existe aquí una información abstracta flotando al margen de la materia: existen moléculas, estructuras celulares, organismos y poblaciones sometidos a procesos físicos y biológicos. La información evolutiva se mantiene porque existen mecanismos materiales capaces de conservar y reproducir determinadas configuraciones.

La cuestión adquiere una dimensión todavía más profunda cuando recordamos que todo almacenamiento y procesamiento de información se realiza mediante procesos físicos. Rolf Landauer mostró que las operaciones computacionales no pueden separarse de la física que las hace posibles y relacionó la irreversibilidad lógica con la disipación termodinámica. En su formulación clásica, el borrado irreversible de información posee un coste termodinámico mínimo, expresado mediante la cantidad (kT\ln 2) por bit bajo las condiciones correspondientes. [2] La importancia de este resultado no reside únicamente en el valor energético concreto, sino en establecer que determinadas operaciones informacionales poseen consecuencias físicas inevitables.

Esto permite formular una distinción esencial: información y energía no son equivalentes. Una cantidad de información no puede identificarse simplemente con una cantidad determinada de energía. Landauer insistió precisamente en que la realización física de la información debe analizarse en función de los procesos concretos mediante los cuales se representa y manipula. No toda operación sobre un bit implica necesariamente el mismo consumo energético y, de hecho, la disipación mínima está asociada específicamente a la irreversibilidad lógica del borrado, no a la mera existencia de información. [2]

Charles Bennett desarrolló posteriormente el análisis termodinámico de la computación y mostró que, en principio, ciertas operaciones lógicamente reversibles pueden realizarse sin la misma disipación mínima asociada a las operaciones irreversibles. Esto resulta relevante porque impide convertir el principio de Landauer en una afirmación demasiado general según la cual "cada bit consume una cantidad fija de energía". La relación entre información y termodinámica depende de la naturaleza física y lógica de la operación realizada. [3]

La conclusión que podemos extraer es más precisa y más interesante: la información no es energía, pero la información físicamente realizada forma parte de procesos materiales sometidos a las restricciones de la energía y la termodinámica. Almacenar, transmitir o transformar información exige estados físicos concretos y, cuando las operaciones son irreversibles, puede implicar disipación. La información, por tanto, no escapa del mundo físico; existe en él mediante configuraciones capaces de producir diferencias funcionales.

Esta consideración permite regresar a la cuestión inicial desde una perspectiva diferente. Si determinados sistemas pueden conservar diferencias, transmitirlas y utilizarlas para modificar sus transformaciones, entonces la información deja de ser únicamente una descripción que nosotros hacemos de esos sistemas y pasa a constituir una dimensión funcional de su comportamiento. La secuencia genética no necesita que alguien la lea para participar en la organización de un organismo. Una célula no necesita comprender una señal química para modificar su comportamiento como consecuencia de ella. Un sistema nervioso no necesita formular verbalmente una representación para utilizar una regularidad aprendida.

La información puede, por tanto, preceder a la interpretación consciente. Puede existir una continuidad entre la conservación física de diferencias, su transmisión, su utilización funcional y, mucho más tarde, su interpretación por sistemas capaces de representar el mundo. La conciencia no crea la información; introduce nuevas formas de relacionarla y utilizarla.

Este punto resulta decisivo para nuestra hipótesis. Si la información aparece únicamente cuando un observador consciente la reconoce, entonces su papel en la historia del universo sería necesariamente secundario y dependiente de la aparición de organismos capaces de interpretarla. Pero si determinados sistemas físicos pueden conservar y utilizar diferencias funcionalmente relevantes antes de que exista conciencia, entonces la historia de la información puede ser mucho más antigua que la historia del pensamiento.

La cuestión no consiste en afirmar que el universo "contenga información" como si esta fuera una sustancia independiente, sino en preguntar si la capacidad de conservar y utilizar diferencias puede convertirse en una propiedad organizativa de determinados sistemas físicos. En ese caso, la información no sería una fuerza adicional ni una entidad separada de la materia y la energía. Sería una dimensión relacional que adquiere relevancia cuando un sistema puede conservar estados, establecer diferencias entre ellos y utilizar esas diferencias para orientar transformaciones posteriores.

Esta posibilidad introduce además una dimensión temporal. Cuando una configuración del pasado puede mantenerse y afectar a un estado posterior, el sistema deja de ser completamente indiferente a su propia historia. La información permite que determinadas diferencias sobrevivan a la transformación y puedan intervenir en nuevas transformaciones. La historia deja así de ser únicamente una secuencia de acontecimientos ya desaparecidos y comienza a convertirse en un componente físicamente relevante del estado presente.

La vida amplifica extraordinariamente esta capacidad. La herencia permite conservar configuraciones durante generaciones; la regulación celular permite

utilizar información para mantener estados internos; el aprendizaje permite modificar respuestas a partir de experiencias anteriores; y los sistemas nerviosos permiten integrar grandes cantidades de información para anticipar acontecimientos y seleccionar comportamientos. Cada una de estas capacidades representa un aumento cualitativo en la manera de conservar, relacionar y utilizar información.

No obstante, no debemos interpretar esta sucesión como una escala inevitable. Que una determinada capacidad pueda surgir a partir de otra no significa que la naturaleza esté obligada a producirla. La evolución no necesita perseguir un objetivo previamente establecido. Lo que podemos observar es que, una vez aparece una estructura capaz de conservar y utilizar información, se abren posibilidades que antes no existían.

Desde esta perspectiva, la información podría adquirir un papel progresivamente más importante en la organización de determinados sistemas energéticos. La energía proporciona la capacidad física para realizar transformaciones; la organización determina cómo se relacionan esas transformaciones; y la información permite conservar diferencias y utilizarlas para condicionar transformaciones posteriores. Son tres dimensiones distintas que pueden llegar a integrarse dentro de un mismo sistema.

La hipótesis que comienza a aparecer es, por tanto, más concreta que la idea de una "evolución de la información" entendida en sentido metafórico. Podemos preguntarnos si existe una continuidad funcional entre la capacidad de conservar información y la capacidad de organizar transformaciones energéticas. Si un sistema puede registrar diferencias, mantenerlas, combinarlas y utilizarlas, podría adquirir una capacidad mayor para modificar su relación con el entorno. La información no produciría energía, pero podría aumentar la eficacia con la que un sistema organiza el uso de la energía de la que dispone.

Esta formulación todavía no demuestra que exista una tendencia universal. Tampoco demuestra que la información posea una dirección evolutiva propia ni que el universo tienda hacia sistemas progresivamente más informacionales. Es una pregunta abierta que solo puede adquirir sentido si primero comprendemos cómo la persistencia física puede convertirse en una capacidad organizada para conservar información y utilizarla.

La información necesita soporte. Necesita persistencia. Necesita diferencias distinguibles. Y, cuando entra a formar parte de un sistema capaz de utilizarla, puede comenzar a modificar el modo en que ese sistema responde a su entorno.

La siguiente cuestión surge entonces de manera natural: ¿qué ocurre cuando una diferencia del pasado no solo permanece, sino que comienza a intervenir activamente en la conservación del sistema que la contiene?
Ese será el problema de la persistencia y de la prememoria.

Referencias al Capítulo II

[1] Claude E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", Bell System Technical Journal, vol. 27, 1948, pp. 379–423 y 623–656. Shannon formalizó matemáticamente la información en el contexto de la comunicación y distinguió el problema técnico de la transmisión del contenido semántico de los mensajes. Wiley Online Library
[2] Rolf Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process", IBM Journal of Research and Development, vol. 5, n.º 3, 1961, pp. 183–191. El trabajo relaciona la irreversibilidad lógica con la irreversibilidad física y establece el límite termodinámico asociado al borrado irreversible. DOI
[3] Charles H. Bennett, "The Thermodynamics of Computation—A Review", International Journal of Theoretical Physics, vol. 21, 1982, pp. 905–940. Bennett analiza la relación entre computación, reversibilidad lógica y disipación termodinámica, mostrando por qué no debe confundirse información con un consumo energético fijo por operación.

CAPITULO III

La Persistencia:
Cuando el Pasado Comienza a Intervenir en el Futuro

La transformación es una condición permanente de la realidad física. Las estructuras aparecen, cambian, se descomponen y son sustituidas por otras. Sin embargo, no todas las transformaciones eliminan inmediatamente los efectos de lo ocurrido anteriormente. Algunas configuraciones pueden permanecer durante determinados intervalos y condicionar las transformaciones posteriores. La existencia de esta persistencia constituye una propiedad fundamental para comprender cómo una realidad en transformación puede, al mismo tiempo, conservar parte de su historia.

Debemos distinguir desde el principio entre persistencia y memoria. Una estructura puede permanecer estable sin poseer memoria en el sentido biológico o cognitivo. Una configuración molecular, una estructura cristalina o una modificación permanente de un material pueden conservar durante cierto tiempo las consecuencias de acontecimientos anteriores sin que exista ningún mecanismo de representación o recuperación de esa información. La persistencia es, por tanto, más elemental que la memoria.

Podemos encontrar ejemplos de dependencia respecto del pasado en numerosos sistemas físicos y químicos. Determinados materiales conservan modificaciones producidas por condiciones anteriores; algunos sistemas presentan fenómenos de histéresis, en los que su estado actual depende no solo de las condiciones presentes sino también de la trayectoria seguida para alcanzarlo; y determinadas reacciones químicas producen compuestos que modifican las condiciones de las transformaciones posteriores. En estos casos, el pasado no desaparece por completo de la dinámica del sistema: queda incorporado, en alguna medida, a su estado presente.

Esta observación permite introducir una idea que será fundamental en nuestra investigación. Cuando una transformación deja una modificación capaz de persistir y esa modificación influye posteriormente sobre el comportamiento del sistema, podemos decir que existe una forma elemental de conservación de historia. Todavía no hablamos de memoria, porque no existe necesariamente representación, recuperación deliberada ni reconocimiento de un acontecimiento anterior. Existe simplemente una diferencia que ha sobrevivido a la transformación.

En este ensayo denominaremos provisionalmente prememoria a esta capacidad elemental de un sistema para conservar efectos de estados anteriores de manera que estos condicionen estados posteriores, aun cuando no exista representación, conciencia ni memoria biológica propiamente dicha. El término no pretende designar una categoría científica establecida. Es una herramienta conceptual creada para describir el posible antecedente funcional de formas posteriores de memoria.

La prememoria, entendida de este modo, no implica que un sistema "recuerde" algo. No existe necesariamente un contenido almacenado que pueda ser recuperado. Existe una configuración que permanece y que, precisamente por permanecer, modifica las posibilidades futuras del sistema. La diferencia entre ambos conceptos es fundamental. Una piedra calentada por el Sol puede conservar durante un tiempo parte de ese efecto; un material sometido a una deformación puede conservarla; una configuración química puede alterar las reacciones posteriores. Ninguno de estos fenómenos constituye memoria biológica. Sin embargo, todos muestran que el pasado puede dejar una huella físicamente eficaz sobre el presente.

Esta posibilidad adquiere especial importancia cuando la persistencia deja de ser una simple estabilidad pasiva y comienza a participar en procesos de organización. Un estado que permanece puede convertirse en una condición para estados posteriores. Una modificación puede favorecer unas transformaciones y dificultar otras. Una configuración puede actuar como condición de contorno para nuevas reacciones. La historia comienza así a adquirir un papel causal dentro de la dinámica del sistema.

En este punto aparece una diferencia esencial entre una estructura estable y un sistema capaz de aprovechar esa estabilidad. La primera simplemente permanece. El segundo utiliza, por decirlo así, las consecuencias de su propia historia. Esta distinción será fundamental para comprender posteriormente la autorregulación y la vida.

La relación entre estado presente e historia previa está ampliamente documentada en los sistemas biológicos. La llamada memoria epigenética, por ejemplo, permite que determinados estados de regulación génica se mantengan a través de divisiones celulares. Algunas modificaciones epigenéticas pueden conservar estados de expresión y contribuir a mantener la identidad de una línea celular sin modificar la secuencia de ADN. En este sentido, la biología ofrece ejemplos concretos de cómo un estado previo puede dejar una configuración persistente que continúa influyendo en estados posteriores. [1]

Esto no significa que la memoria epigenética sea simplemente una versión biológica de nuestra prememoria. Se trata de mecanismos moleculares

específicos y mucho más complejos. La comparación sirve para mostrar algo más elemental: en los sistemas vivos, la historia del sistema puede quedar físicamente incorporada a su estado y seguir produciendo consecuencias después de que haya desaparecido el estímulo que originó esa modificación.

La persistencia también resulta fundamental cuando pasamos de una escala individual a una escala evolutiva. Para que una característica pueda participar en un proceso de selección a lo largo de generaciones debe existir algún mecanismo que permita conservar y transmitir determinadas diferencias. Los sistemas replicantes introducen precisamente esa posibilidad: una configuración puede no limitarse a persistir durante la existencia de un sistema individual, sino reproducirse en sistemas posteriores. La investigación sobre el origen de la vida considera la persistencia de sistemas replicantes y su capacidad de transmitir variaciones como una cuestión central para comprender la transición desde la química prebiótica hacia procesos evolutivos. [2]

Aquí aparece una transformación conceptual importante. La persistencia deja de ser únicamente duración y comienza a convertirse en continuidad. Una estructura que simplemente permanece durante un intervalo conserva su estado; una estructura capaz de reproducir determinadas características extiende esa conservación más allá de su propia existencia. El pasado puede entonces intervenir no solo en el futuro inmediato de un sistema, sino en una sucesión de sistemas relacionados.

La reproducción introduce así una dimensión histórica que la materia inerte puede presentar únicamente de manera limitada. La información hereditaria permite que determinadas configuraciones se mantengan a través de generaciones, aunque cada organismo individual desaparezca. La evolución puede actuar entonces sobre una historia acumulada de variaciones y persistencias. El pasado deja de ser únicamente una condición del estado presente y comienza a formar parte de la estructura de las poblaciones futuras.

Esta perspectiva ayuda a comprender por qué la información necesita algo más que una diferencia. Necesita persistencia. Una diferencia que desaparece inmediatamente puede existir físicamente, pero no puede ser conservada, transmitida ni utilizada posteriormente. Para que una diferencia se convierta en información funcional debe existir algún mecanismo capaz de mantenerla durante el tiempo suficiente para que produzca consecuencias.

De esta manera podemos establecer una relación conceptual entre los capítulos anteriores. La energía permite que se produzcan transformaciones; determinadas condiciones termodinámicas permiten la aparición de estructuras organizadas; algunas configuraciones pueden persistir; y la persistencia permite que ciertas diferencias sobrevivan a la transformación. Cuando esas diferencias

pueden ser conservadas, transmitidas o utilizadas, adquieren las características funcionales que nos permiten hablar de información.

La secuencia no debe interpretarse como una ley universal ni como una reconstrucción demostrada de la historia del universo. Es una hipótesis conceptual que nos permite formular una pregunta más precisa. ¿Puede la persistencia física constituir una condición previa para la aparición de sistemas capaces de conservar información y utilizarla para mantener su organización?

Si la respuesta fuera afirmativa, existiría una continuidad interesante entre fenómenos que normalmente estudiamos por separado. La estabilidad de una configuración física, la conservación de una diferencia, la memoria biológica y la herencia no serían fenómenos equivalentes, pero podrían representar distintos grados de una misma capacidad fundamental: la capacidad de que el pasado permanezca físicamente relevante para el futuro.

La vida habría llevado esta capacidad a un nivel cualitativamente diferente. En una célula, la conservación de información no es una consecuencia accidental de la estabilidad de una estructura, sino parte de un sistema integrado de regulación, metabolismo, reparación y reproducción. La información conservada puede contribuir a mantener las condiciones que permiten que el propio sistema continúe existiendo.

Este paso es decisivo. Mientras una estructura simplemente conserva una modificación, no existe necesariamente una relación entre esa persistencia y su supervivencia. Cuando un sistema utiliza determinadas configuraciones para regular sus procesos y conservar su organización, la persistencia comienza a integrarse en una dinámica de autorregulación.

Todavía no estamos ante una inteligencia, ni ante una anticipación consciente, ni siquiera ante una memoria en sentido cognitivo. Estamos ante algo mucho más elemental: un sistema cuyo estado presente conserva parte de su historia y cuya historia influye sobre las transformaciones que pueden producirse posteriormente.

Podemos contemplar entonces la aparición de la vida desde una perspectiva diferente. No se trataría únicamente de encontrar el momento exacto en que la materia "se convirtió" en vida, sino de identificar la integración progresiva de capacidades que antes podían encontrarse separadas: transformación energética, persistencia, conservación de información, regulación y reproducción. La investigación contemporánea sobre el origen de la vida estudia precisamente la transición desde sistemas químicos hacia entidades capaces de mantener organización, procesar información y evolucionar, aunque el camino exacto entre esos estados siga siendo una cuestión abierta. [3]

La importancia de esta perspectiva reside en que desplaza ligeramente la pregunta. En lugar de preguntarnos únicamente cuándo apareció la primera célula, podemos preguntarnos qué propiedades físicas y químicas hicieron posible que determinadas organizaciones materiales conservaran sus propias condiciones de existencia.

La persistencia sería entonces una de las condiciones más elementales de esa posibilidad. Antes de recordar, hay que conservar. Antes de aprender, debe existir algo que pueda mantenerse. Antes de transmitir información, debe existir una configuración que pueda sobrevivir a la transformación. Y antes de que el pasado pueda ser utilizado para regular el futuro, ese pasado debe dejar una huella físicamente eficaz.

Esta es la razón por la que denominamos prememoria a esta forma elemental de persistencia funcional. No porque un sistema primitivo posea una memoria rudimentaria en el sentido psicológico, sino porque aparece por primera vez una condición que hará posible que la historia del sistema tenga consecuencias sobre su futuro.

El paso siguiente será decisivo: ¿qué ocurre cuando esa persistencia deja de ser solamente una consecuencia de la estabilidad y comienza a formar parte de un sistema que utiliza información para conservarse?

Ahí comienza el problema de la autorregulación y, con él, el umbral que conduce desde la persistencia hacia la vida.

Referencias del Capítulo III

[1] Kim, M. & Costello, J. (2017), "DNA methylation: an epigenetic mark of cellular memory", Experimental & Molecular Medicine, 49, e322. El artículo revisa cómo determinados patrones de metilación pueden conservarse durante divisiones celulares y contribuir a mantener estados celulares. Nature
[2] Pross, A. (2013), "The origin of life: what we know, what we can know and what we will never know", Interface Focus. El trabajo analiza la persistencia y reproducción de sistemas químicos como problema central en el origen de la vida. PubMed Central (PMC)
[3] "Origins of life: the possible and the actual" (2025), revisión interdisciplinar sobre los problemas actuales del origen de la vida, incluyendo la transición desde sistemas químicos hacia entidades capaces de portar información, evolucionar y formar sistemas protocelulares.

CAPITULO IV

La Célula y el Nacimiento de la Autorregulación

La aparición de la célula constituye uno de los grandes umbrales de la historia de la vida. Sin embargo, resulta problemático imaginarla como una frontera absoluta entre la materia inerte y la materia viva, como si en un momento determinado una organización química hubiera adquirido de manera repentina todas las propiedades que asociamos con la vida. La investigación sobre el origen de la vida no dispone todavía de una reconstrucción completa y demostrada de ese proceso. Existen diferentes escenarios y modelos que estudian cómo pudieron integrarse progresivamente compartimentación, metabolismo, replicación e información en sistemas químicos capaces de mantenerse y evolucionar. [1]

Esta incertidumbre no significa que no sepamos nada sobre el problema. Al contrario, conocemos muchas de las propiedades fundamentales que distinguen a las células y podemos estudiar experimental y teóricamente cómo algunos de sus componentes podrían haber surgido y combinado. Las investigaciones contemporáneas sobre protocélulas y sistemas químicos autoorganizados consideran precisamente la integración de compartimentos, redes metabólicas, moléculas capaces de transmitir información y mecanismos de reproducción como uno de los grandes desafíos para comprender la transición hacia la vida. [1][2]

La célula puede contemplarse, desde esta perspectiva, como una organización material capaz de mantener una diferencia respecto de su entorno mediante un intercambio permanente de materia y energía. La membrana establece una frontera física que permite mantener un medio interno distinto del exterior, controlar intercambios y concentrar determinadas reacciones. En las células actuales, esta capacidad está extraordinariamente desarrollada: las membranas actúan como barreras selectivas y los sistemas de transporte permiten regular la entrada de nutrientes y la salida de productos. La compartimentación, por tanto, no es un detalle secundario de la organización celular, sino una de las condiciones que permiten que determinadas reacciones permanezcan relacionadas dentro de un mismo sistema. [2]

Pero una frontera por sí sola no constituye una célula viva. Un compartimento puede existir sin metabolismo organizado, sin reproducción y sin capacidad para mantener activamente sus condiciones internas. La vida celular surge de la integración de múltiples procesos que dependen unos de otros. En las células

actuales, la captación y transformación de materia y energía, la regulación de las condiciones internas, la conservación de información hereditaria, la síntesis y reparación de componentes y la reproducción forman una red de procesos interdependientes.

Por ello, la autorregulación debe ocupar un lugar central en nuestra interpretación. Un sistema autorregulado no necesita conocer conscientemente aquello que regula. Significa que dispone de procesos mediante los cuales determinadas variaciones internas o externas desencadenan respuestas capaces de mantener algunas variables dentro de condiciones compatibles con su funcionamiento. La biología moderna describe numerosos mecanismos celulares de este tipo. Las respuestas al estrés, por ejemplo, pueden modificar procesos internos para preservar funciones celulares y contribuir al mantenimiento de la homeostasis. [3]

La homeostasis no debe interpretarse como una inmovilidad. Una célula viva no conserva exactamente el mismo estado en todo momento. Consume recursos, produce residuos, modifica moléculas, intercambia iones, sintetiza proteínas y responde continuamente a las condiciones externas. Lo que mantiene es una organización dinámica dentro de determinados límites. Su estabilidad no procede de la ausencia de transformación, sino de la capacidad de regular las transformaciones que experimenta.

Esta diferencia resulta fundamental para nuestro argumento. En los capítulos anteriores hemos considerado la persistencia como la posibilidad de que determinadas configuraciones sobrevivan a las transformaciones. La célula introduce una capacidad nueva: no se limita a conservar pasivamente una configuración, sino que desarrolla procesos que contribuyen activamente a conservar las condiciones de su propia organización.

Aquí la información adquiere una función diferente. Una configuración molecular hereditaria no es simplemente algo que permanece; participa en una red de procesos que permite producir componentes celulares y mantener determinadas funciones. Del mismo modo, las señales procedentes del entorno pueden desencadenar respuestas internas. La información comienza así a formar parte de un sistema de regulación.

No debemos imaginar, sin embargo, el material genético como un plano completo que contenga de manera literal todas las instrucciones necesarias para construir una célula. La organización celular emerge de la interacción entre información genética, estructuras moleculares, metabolismo, membranas, señales y condiciones ambientales. Las investigaciones actuales sobre células sintéticas y sistemas mínimos subrayan precisamente que la vida celular no puede reducirse a una única molécula portadora de información, sino que depende de la integración de diferentes componentes y procesos. [4]

Podemos distinguir entonces tres dimensiones que hasta ahora habían aparecido separadas. La energía permite realizar transformaciones; la información permite conservar y transmitir diferencias funcionalmente relevantes; y la organización establece las relaciones mediante las cuales esas transformaciones se mantienen coordinadas. Ninguna de estas dimensiones puede sustituirse por las otras. La energía no es información, la información no es organización y la organización no crea energía. Pero pueden integrarse dentro de un mismo sistema.

Esta integración permite comprender mejor qué representa una célula. No es simplemente materia encerrada dentro de una membrana. Es una red organizada de transformaciones capaz de utilizar energía del entorno para mantener una configuración interna y reproducir determinados componentes de esa organización. Su existencia depende precisamente del flujo continuo de materia y energía que atraviesa su estructura.

Desde el punto de vista termodinámico, esto no constituye una excepción a la segunda ley. La célula mantiene organización interna porque es un sistema abierto que intercambia materia y energía con el entorno. Su capacidad para conservar un estado alejado del equilibrio depende de que pueda realizar transformaciones y disipar energía. La organización biológica no elimina la entropía; la incorpora dentro de una dinámica de intercambio y transformación.

Aquí aparece una relación particularmente importante con el capítulo primero. Las estructuras disipativas estudiadas por Prigogine demostraron que determinados sistemas alejados del equilibrio pueden generar y mantener organización mediante flujos de energía. La célula representa una forma extraordinariamente más compleja de este principio general, aunque no pueda afirmarse simplemente que una célula sea una estructura disipativa en el mismo sentido que una estructura física elemental estudiada en termodinámica. Lo que podemos afirmar es que la vida comparte la condición fundamental de ser un sistema abierto cuya organización depende de flujos continuos de materia y energía.

La diferencia cualitativa aparece cuando esa organización incorpora información hereditaria, regulación interna y capacidad reproductiva. La célula no solamente disipa energía mientras mantiene una estructura; utiliza redes de procesos coordinados para reconstruir y renovar continuamente esa estructura. En cierto sentido, la organización celular debe producir continuamente las condiciones que permiten su propia continuidad.

Esta propiedad permite formular el concepto de autorregulación con mayor precisión. Autorregularse significa que determinados estados del sistema pueden influir sobre procesos que contribuyen a mantener otros estados del propio sistema. Existe, por tanto, una relación circular entre actividad, información

y conservación de la organización. Una modificación interna puede activar una respuesta que reduzca sus consecuencias; una variación externa puede desencadenar mecanismos que compensen sus efectos; una alteración de determinados componentes puede activar procesos de reparación o sustitución. La biología contemporánea proporciona numerosos ejemplos de estos mecanismos. Las células disponen de redes de detección y respuesta frente a alteraciones del medio, daños moleculares y cambios en la disponibilidad de recursos. La respuesta celular al estrés y los sistemas que mantienen la homeostasis muestran que la estabilidad biológica es una propiedad dinámica producida por mecanismos de regulación. [3]

La reproducción introduce otra transformación decisiva. Cuando una organización capaz de autorregularse puede generar una nueva organización relacionada con ella, parte de la información que sostiene su funcionamiento puede extenderse más allá de la existencia del individuo. La persistencia deja entonces de depender únicamente de la duración de una estructura individual. Se convierte en continuidad entre generaciones.

Esta continuidad crea las condiciones para la acumulación histórica. Las variaciones que aparecen en sistemas capaces de reproducirse pueden ser conservadas, modificadas o eliminadas a través de generaciones. La evolución no necesita una finalidad para producir acumulación de diferencias. Basta con que existan variación, herencia y procesos de selección capaces de modificar la frecuencia de determinadas características.

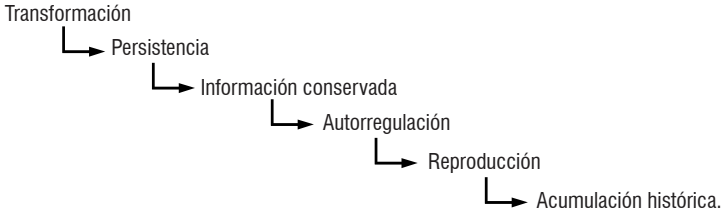
Desde esta perspectiva, la célula representa un punto de integración entre procesos que anteriormente podían existir de manera separada. Transformación energética, persistencia, información, compartimentación, regulación y reproducción comienzan a formar parte de una misma organización. La vida no aparece necesariamente como una propiedad aislada que se añade a la materia, sino como una forma de integración progresiva de capacidades físicas y químicas.

Esta interpretación coincide con una de las cuestiones centrales de la investigación contemporánea sobre el origen de la vida: cómo pudieron integrarse sistemas de información, metabolismo y compartimentación en entidades capaces de evolucionar. Las investigaciones actuales sobre autoensamblaje fuera del equilibrio estudian precisamente cómo redes químicas, compartimentos y procesos de autoorganización pueden combinarse para producir sistemas con propiedades semejantes a las de la materia viva. [1]

Pero debemos mantener una diferencia fundamental entre estudiar esas posibilidades y afirmar que ya conocemos el camino histórico concreto que condujo a la primera célula. No lo conocemos. Existen múltiples hipótesis sobre

el papel relativo que pudieron desempeñar el metabolismo, las moléculas replicantes, las membranas, los gradientes energéticos y diferentes ambientes geoquímicos. La ciencia actual investiga esas posibilidades sin haber establecido una secuencia única y definitiva. [1][5]

Por eso, la secuencia que estamos construyendo debe entenderse como una herramienta conceptual y no como una reconstrucción histórica demostrada:



Cada uno de estos fenómenos puede estudiarse científicamente. Lo que todavía pertenece a nuestra interpretación es la posibilidad de considerarlos como una integración progresiva de capacidades que permite comprender el tránsito desde sistemas físicos y químicos hacia sistemas vivos.

La importancia de la autorregulación reside precisamente en ese punto. La persistencia anterior podía conservar una configuración; la célula comienza a utilizar procesos internos para conservar las condiciones que permiten que esa configuración continúe existiendo. El sistema deja de ser solamente aquello que permanece y empieza a participar activamente en su propia permanencia.

Esto supone un cambio profundo en la relación entre pasado y futuro. La información heredada no solamente registra una configuración anterior; interviene en la construcción y mantenimiento de una configuración posterior. La historia comienza a convertirse en una herramienta funcional para la continuidad.

Todavía no existe anticipación en el sentido desarrollado que encontraremos posteriormente. Una célula no necesita representar conscientemente un acontecimiento futuro para responder a señales presentes. Puede reaccionar ante cambios químicos, físicos o energéticos mediante mecanismos que han sido seleccionados y conservados porque contribuyen a mantener su organización. La respuesta puede ser funcionalmente adecuada sin contener una representación del futuro.

Sin embargo, aquí aparece el primer paso hacia una propiedad que tendrá una importancia creciente en la historia de la vida: utilizar información sobre el estado

presente para modificar una transformación antes de que sus consecuencias comprometan la continuidad del sistema. La regulación introduce así una forma elemental de relación entre información y futuro.

La célula constituye, por tanto, un umbral conceptual. Antes de ella podemos encontrar persistencia, autoensamblaje, redes químicas, compartimentación y diferentes formas de conservación de estados. Con ella aparece una integración mucho más compleja: un sistema material capaz de utilizar energía, conservar información, regular procesos, reproducirse y mantener una organización dinámica frente a un entorno cambiante.

No podemos afirmar que esta integración fuera inevitable. Tampoco podemos afirmar que exista una tendencia universal de la materia hacia la vida. Lo que podemos decir es que, una vez que surge una organización capaz de conservar información y utilizarla para mantener sus propias condiciones de existencia, aparece una nueva dimensión en la historia de la materia: la posibilidad de que las experiencias acumuladas por generaciones posteriores modifiquen progresivamente la relación del sistema con su entorno.

La cuestión siguiente será entonces qué sucede cuando esa capacidad de regulación deja de limitarse a compensar cambios presentes y comienza, mediante la evolución y el aprendizaje, a utilizar regularidades del pasado para modificar respuestas ante acontecimientos que todavía no han ocurrido.
El paso de la reacción a la anticipación será el siguiente umbral.

Referencias al Capítulo IV

[1] Singh, A. et al., "Non-equilibrium self-assembly for living matter-like properties", Nature Reviews Chemistry, 2024. Revisión sobre la integración de compartimentación, redes de reacción, replicación y condiciones alejadas del equilibrio en sistemas prebiológicos. Nature
[2] "From Self-Assembled Vesicles to Protocells", revisión sobre vesículas, compartimentación, termodinámica del autoensamblaje y transición hacia protocélulas. PubMed Central (PMC)
[3] Galluzzi, L., Yamazaki, T. & Kroemer, G., "Linking cellular stress responses to systemic homeostasis", Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2018. Apoya la descripción de los mecanismos celulares de respuesta al estrés y mantenimiento de la homeostasis. Nature
[4] Samanta, A. et al., "DNA-empowered synthetic cells as minimalistic life forms", Nature Reviews Chemistry, 2024. Resulta especialmente útil para nuestra idea de que la vida celular no puede reducirse a ADN aislado, sino que integra compartimentación, procesamiento de información y múltiples funciones. Nature
[5] "Origins of life: the possible and the actual", revisión interdisciplinar reciente sobre el origen de la vida, las protocélulas y la transición entre sistemas químicos e información capaz de evolucionar.

CAPITULO V

De la Reacción a la Anticipación

Hasta este punto hemos seguido una secuencia en la que cada nueva capacidad puede entenderse como una ampliación de alguna capacidad anterior. La transformación permite que determinados estados persistan; la persistencia hace posible que los efectos del pasado permanezcan en el sistema; esa permanencia puede constituir información; la información puede intervenir en la autorregulación; la autorregulación, integrada con la reproducción, permite que determinadas configuraciones atraviesen generaciones; y la evolución hace posible que esas configuraciones se modifiquen y acumulen historia. Pero esta acumulación introduce una posibilidad nueva: que el pasado no solo condicione la respuesta ante lo que ya está sucediendo, sino que pueda utilizarse para modificar el comportamiento antes de que determinadas condiciones lleguen a producirse.

En ese punto aparece la anticipación.

Conviene precisar desde el principio qué entendemos aquí por anticipación. No hablamos todavía de imaginar conscientemente un acontecimiento futuro ni de construir mentalmente una representación explícita de aquello que aún no ha ocurrido. En un sentido biológico elemental, anticipar significa que un sistema modifica su estado presente a partir de una información que mantiene una relación suficientemente estable con una condición futura. El organismo no necesita saber conceptualmente qué va a suceder. Basta con que una señal presente, una regularidad temporal, una experiencia anterior o una configuración heredada desencadene una respuesta que resulte funcional ante una situación que todavía no se ha producido.

La fisiología ofrece ejemplos claros de esta diferencia entre reacción y anticipación. Una respuesta reactiva comienza cuando una alteración ya se ha producido; una respuesta anticipatoria puede iniciarse antes de que la alteración alcance al organismo. Los ritmos circadianos constituyen uno de los ejemplos más evidentes: numerosos organismos poseen mecanismos internos capaces de sincronizar diferentes procesos fisiológicos con ciclos ambientales relativamente regulares, de modo que determinadas funciones pueden prepararse antes de que cambien las condiciones externas. La organización interna no se limita, por tanto, a responder al ambiente cuando este cambia,

sino que puede incorporar regularidades temporales que permiten prepararse para cambios previsibles. Este fenómeno resulta especialmente importante para nuestra hipótesis porque muestra que la anticipación no es necesariamente una propiedad exclusiva de organismos dotados de sistemas nerviosos complejos. Existen procesos anticipatorios en organismos y sistemas biológicos muy sencillos, incluidos microorganismos y redes reguladoras que pueden responder a señales presentes en función de las consecuencias que habitualmente las siguen. La investigación sobre plasticidad anticipatoria ha mostrado que determinadas regularidades ambientales pueden llegar a modificar la organización de los organismos cuando las señales precursoras mantienen una relación suficientemente fiable con acontecimientos posteriores.[2]

La evolución puede explicar esta capacidad sin necesidad de introducir conocimiento consciente del futuro. Si determinadas condiciones ambientales aparecen con suficiente regularidad, las variaciones que permiten responder de manera más eficaz a sus señales precursoras pueden resultar favorecidas por la selección natural. Con el tiempo, una relación entre señal y respuesta puede quedar incorporada a la organización del organismo. El sistema no anticipa porque conozca el futuro; anticipa porque su historia evolutiva ha configurado una respuesta presente frente a una regularidad ambiental que, bajo determinadas condiciones, suele preceder a un acontecimiento posterior.

Esta distinción es fundamental. La anticipación biológica no implica necesariamente una representación consciente del futuro. Puede existir una relación funcional entre presente y futuro sin que exista una imagen mental de ese futuro. Una planta puede modificar determinados procesos fisiológicos en relación con los ciclos ambientales; un microorganismo puede alterar su metabolismo ante señales que históricamente han precedido a determinadas condiciones; un animal puede modificar su conducta a partir de asociaciones aprendidas. En ninguno de estos casos es necesario atribuir al sistema una concepción consciente de lo que todavía no ha ocurrido.

Aquí comienza a adquirir importancia la herencia. La evolución no conserva únicamente estructuras físicas. También puede conservar relaciones funcionales construidas a lo largo de la historia de una población. Una determinada configuración genética puede favorecer la producción de proteínas, ritmos fisiológicos, mecanismos metabólicos o respuestas regulatorias que han resultado eficaces bajo determinadas condiciones. De esta manera, parte de la historia de una población queda incorporada físicamente a sus descendientes.

La herencia puede entenderse así como una forma extraordinariamente poderosa de continuidad temporal. Un organismo puede nacer sin haber experimentado personalmente determinadas condiciones ambientales y, sin embargo, poseer una organización que responda adecuadamente ante ellas

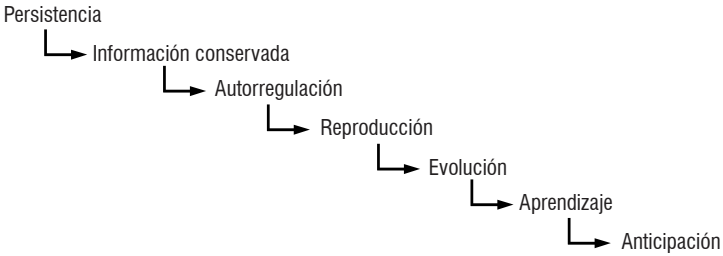
porque generaciones anteriores han dejado incorporadas determinadas soluciones funcionales. El pasado de la población interviene de esta manera en el comportamiento del presente.

Pero la evolución introduce una escala temporal y el aprendizaje introduce otra. Mientras la evolución transmite modificaciones entre generaciones, el aprendizaje permite que un mismo organismo modifique determinadas respuestas a partir de su propia experiencia. La memoria deja entonces de ser únicamente una propiedad de la continuidad hereditaria y adquiere una dimensión individual. Una experiencia puede modificar el estado de un organismo de tal manera que una situación posterior ya no encuentre exactamente el mismo sistema que existía antes de aquella experiencia.[3]

El aprendizaje constituye, por tanto, una ampliación extraordinaria de la capacidad adaptativa. Un organismo que solo pudiera responder mediante configuraciones heredadas tendría que depender principalmente de cambios evolutivos que se producen entre generaciones. Un organismo capaz de aprender dispone de otra escala temporal: puede modificar determinadas respuestas durante su propia existencia. La información deja así de actuar exclusivamente como herencia y comienza también a actuar como experiencia.
La diferencia entre ambas escalas resulta esencial para nuestra hipótesis. La evolución puede conservar durante generaciones una relación que ha demostrado ser funcional; el aprendizaje puede modificar esa relación durante la vida de un individuo. Ambas capacidades tienen algo en común: permiten que el pasado influya sobre el futuro. La diferencia reside en la velocidad y en el soporte mediante el que se produce esa continuidad.

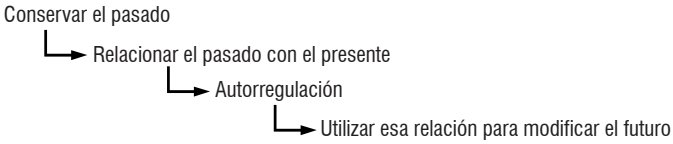
A medida que aparecen sistemas capaces de integrar señales procedentes de diferentes fuentes, conservar determinadas experiencias y modificar sus respuestas, la relación entre información y conducta adquiere una complejidad creciente. La percepción permite detectar diferencias del entorno; la memoria conserva efectos de experiencias anteriores; el aprendizaje modifica respuestas; y la anticipación permite actuar en el presente teniendo en cuenta consecuencias que todavía no se han producido.

Esto no significa que exista una única trayectoria evolutiva ni que todos los organismos deban recorrer necesariamente los mismos pasos. La evolución no constituye una escalera universal hacia una complejidad creciente. Existen múltiples soluciones biológicas, pérdidas de funciones, simplificaciones y adaptaciones a condiciones concretas. La secuencia que aquí proponemos debe entenderse, por tanto, como una reconstrucción funcional de capacidades que pueden integrarse progresivamente, no como una ley histórica de la evolución.
Podemos expresarla provisionalmente de este modo:



La importancia de esta secuencia no reside en afirmar que cada elemento apareciera una sola vez, exactamente en ese orden y de forma independiente. Su interés está en mostrar cómo determinadas capacidades pueden ampliar progresivamente la relación de un sistema con su propia historia. La persistencia permite que algo del pasado permanezca; la información permite que esa diferencia pueda intervenir en procesos posteriores; la autorregulación utiliza determinadas diferencias para conservar la organización; la reproducción extiende configuraciones más allá del individuo; la evolución modifica esas configuraciones a lo largo de generaciones; el aprendizaje permite hacerlo durante la vida; y la anticipación utiliza la información acumulada para modificar el presente ante acontecimientos que todavía no han ocurrido.

En este punto se produce una transformación conceptual especialmente importante. La información deja de limitarse a conservar lo que ha ocurrido y comienza a participar en la determinación de lo que puede ocurrir.
Podríamos expresarlo de una forma muy sencilla:



La información adquiere entonces una dimensión temporal mucho más profunda. Ya no se trata únicamente de que un estado anterior permanezca registrado de alguna manera, sino de que esa permanencia pueda modificar las posibilidades posteriores del sistema.

Esta transformación permite comprender por qué la anticipación representa un paso tan importante en nuestra investigación. Un sistema puramente reactivo responde a una perturbación cuando esta aparece. Un sistema capaz de anticipar puede comenzar a modificar su estado cuando todavía existe una diferencia entre la señal y el acontecimiento. Esa diferencia temporal puede

resultar decisiva para la supervivencia, porque permite preparar recursos, modificar estados fisiológicos, cambiar conductas o evitar determinadas consecuencias antes de que alcancen su máxima intensidad.
Los ritmos circadianos vuelven a ofrecer aquí un ejemplo particularmente claro. El organismo puede modificar determinados procesos antes de que se produzca el cambio ambiental correspondiente porque ha incorporado una regularidad temporal. La anticipación no añade energía al sistema. Lo que modifica es la organización temporal de los procesos que utilizan esa energía.[1][4]

Esta observación conduce directamente a una cuestión que será fundamental en los capítulos posteriores. La información no es energía, pero puede intervenir en la manera en que un sistema organiza las transformaciones energéticas de las que depende. Una diferencia conservada puede orientar una reacción; una red reguladora puede distribuir recursos; una experiencia puede modificar una conducta; una anticipación puede permitir preparar una respuesta antes de que aparezca una perturbación.

Por ello, cuando en este ensayo hablamos de una relación entre información y organización de la energía, no estamos afirmando que la información constituya una nueva forma de energía ni que pueda sustituir las leyes termodinámicas. La propuesta es más limitada y, al mismo tiempo, más precisa: una organización capaz de conservar y utilizar información puede aumentar su capacidad para seleccionar, coordinar y temporalizar las transformaciones energéticas que realiza.

La diferencia es importante. La información no produce gratuitamente el trabajo necesario para realizar una transformación. El organismo continúa dependiendo de flujos materiales y energéticos. Lo que cambia es la capacidad del sistema para dirigir esos recursos hacia determinadas respuestas. Una misma cantidad de energía puede ser utilizada de maneras muy diferentes dependiendo de la organización que controle su distribución y transformación.

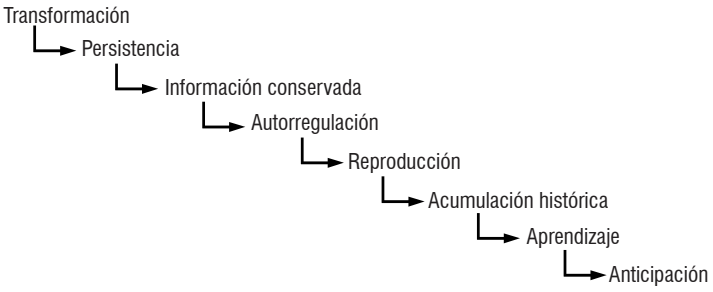
A partir de aquí aparece otro salto conceptual. La anticipación por sí sola tampoco equivale todavía a inteligencia. Un reloj circadiano no necesita comprender el ciclo solar; una bacteria no necesita imaginar conscientemente una condición futura; un organismo puede aprender una asociación sin construir una teoría explícita de sus consecuencias. Lo que aparece primero es una capacidad funcional de relacionar información presente con posibilidades futuras.

Esta distinción permite evitar uno de los problemas que acompañan habitualmente a las explicaciones sobre el origen de la inteligencia: llamar inteligencia a cualquier mecanismo capaz de responder eficazmente. Si todo comportamiento

adaptativo fuera considerado inteligencia, el concepto perdería capacidad explicativa. En nuestra propuesta, la anticipación constituye todavía un nivel anterior. La cuestión decisiva será determinar qué sucede cuando diferentes informaciones pueden integrarse, compararse, combinarse y utilizarse para seleccionar entre diferentes posibilidades.
Aquí comienza a adquirir sentido una concepción más amplia de la inteligencia. No sería necesario situar su origen en un instante concreto ni identificarla exclusivamente con la aparición del cerebro. Podría entenderse como el resultado de una acumulación e integración de capacidades funcionales: conservar información, relacionarla con estados anteriores, detectar regularidades, aprender de la experiencia, anticipar consecuencias y, finalmente, seleccionar entre diferentes posibilidades de acción.

Desde esta perspectiva, el cerebro no aparecería como el origen absoluto de todas estas capacidades, sino como una estructura que las integra y amplifica hasta niveles cualitativamente nuevos. La novedad no consistiría simplemente en disponer de más información, sino en poder establecer relaciones cada vez más complejas entre informaciones diferentes y utilizar esas relaciones para construir alternativas antes de actuar.

Este punto será fundamental para los capítulos siguientes. La acumulación de información no garantiza por sí misma una mayor capacidad de organización. Una enorme cantidad de información sin relaciones funcionales puede ser menos útil que una cantidad reducida correctamente integrada. Lo decisivo comienza a ser la capacidad de seleccionar, relacionar, conservar, modificar y utilizar información en función de diferentes estados posibles.
La anticipación introduce así una nueva dimensión en la historia que estamos reconstruyendo. La información ya no sirve únicamente para conservar la identidad de un sistema frente a la transformación. También puede permitirle modificar su estado antes de que una determinada condición se manifieste plenamente.
La secuencia vuelve entonces a ampliarse:



Y cada nuevo paso aumenta la capacidad de un sistema para utilizar su propia historia. La materia organizada no solo conserva determinados efectos de lo ocurrido; en determinados sistemas, esos efectos pueden modificar el presente y, mediante la anticipación, intervenir en la trayectoria de acontecimientos todavía abiertos.

Es aquí donde comienza a aparecer una diferencia fundamental entre reaccionar y elegir. Una reacción puede ser una respuesta automática ante una perturbación. La anticipación introduce la posibilidad de que diferentes respuestas sean evaluadas en función de sus consecuencias previsibles. Cuando esa capacidad alcanza niveles suficientes de integración, memoria, representación y selección, aparece un fenómeno cualitativamente diferente: un sistema capaz no solo de responder al mundo, sino de construir modelos de posibilidades y utilizarlos para modificar deliberadamente su relación con él.
Ese será el siguiente paso de nuestra investigación.

La pregunta que queda abierta ya no es simplemente cómo un organismo aprende a anticipar. La cuestión es qué sucede cuando la información acumulada puede integrarse hasta permitir que un sistema represente posibilidades, compare alternativas y dirija sus propias transformaciones antes de que estas ocurran.
En ese punto, la información deja de ser únicamente memoria del pasado o instrumento de anticipación y comienza a convertirse en una herramienta para organizar activamente las transformaciones del sistema y de su entorno.
Ahí comienza el siguiente capítulo:
la inteligencia como organizadora de energía.

Referencias al Capítulo V

[1] Mortimer, T., Smith, J. G., Muñoz-Cánoves, P. et al. (2025). Circadian clock communication during homeostasis and ageing. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 26, 314–331.
[2] Petrullo, L., Morris, N. J., Tharin, C. & Dantzer, B. (2025). Harbingers of change: Towards a mechanistic understanding of anticipatory plasticity in animal systems. Functional Ecology, 39, 2999–3020.
[3] Zha, C. & Sossin, W. S. (2022). The molecular diversity of plasticity mechanisms underlying memory: An evolutionary perspective. Journal of Neurochemistry, 163, 444–460.
[4] Zhang, E. E. & Kay, S. A. (2010). Clocks not winding down: unravelling circadian networks. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 11, 764–776. El propio artículo señala que un reloj interno permite anticipar cambios ambientales y utilizar las fuentes de energía de manera más eficiente

CAPITULO VI

La Acumulación:
Cuando la Información Comienza a Construir Historia

Si la persistencia permite que algo del pasado permanezca y la anticipación permite utilizar ese pasado para modificar el presente en función de lo que puede ocurrir, aparece una capacidad todavía más profunda: la posibilidad de que la información no solo se conserve, sino que se acumule.

La diferencia puede parecer pequeña, pero sus consecuencias son enormes. Conservar información significa que una diferencia producida anteriormente puede permanecer disponible. Acumular información significa que diferentes diferencias, experiencias o configuraciones pueden incorporarse sucesivamente a un sistema, modificarlo y convertirse en condiciones para nuevas transformaciones. El sistema ya no parte cada vez desde el mismo estado. Su historia comienza a formar parte de su estructura.

En ese sentido, la vida es profundamente histórica. Cada organismo contiene una parte de la historia evolutiva de su linaje; su desarrollo depende de información heredada; su fisiología incorpora soluciones que han sido seleccionadas durante generaciones; su comportamiento puede modificarse mediante experiencia; y, en determinadas especies, la información puede transmitirse socialmente y transformarse fuera del mecanismo genético. La evolución no conserva únicamente organismos: conserva, modifica y recombina configuraciones que pueden influir sobre las generaciones posteriores.

Esta relación entre evolución e información no es una simple metáfora. La biología evolutiva ha señalado desde hace décadas que importantes transiciones evolutivas están asociadas con nuevas formas de almacenar y transmitir información. El ADN constituye el principal sistema hereditario de los organismos actuales, pero no es la única forma posible de transmisión. También existen formas de herencia no genética y mecanismos de transmisión que adquieren importancia en diferentes niveles de organización.[1]

La consecuencia conceptual es importante. Si una característica puede transmitirse y sufrir modificaciones durante su transmisión, entonces la historia de un sistema puede dejar condiciones para la historia posterior. La evolución adquiere así una dimensión acumulativa, aunque esto no signifique que toda evolución produzca necesariamente mayor complejidad o que exista una dirección universal hacia estructuras más organizadas.

La selección natural no trabaja con un proyecto de futuro. Las variaciones aparecen, las condiciones ambientales cambian y determinadas características pueden aumentar o disminuir su frecuencia en función de sus efectos sobre la reproducción y la supervivencia. Lo que llamamos acumulación evolutiva es, por tanto, el resultado histórico de múltiples procesos de variación, herencia, selección, deriva, interacción ecológica y contingencia. No existe necesidad de introducir una finalidad para explicar que una población pueda terminar poseyendo configuraciones que incorporan una larga historia de modificaciones.

Pero cuando determinadas configuraciones pueden conservarse y modificarse sucesivamente, aparece algo que no estaba presente en una transformación aislada: la posibilidad de construir sobre lo ya construido.

Esta idea resulta especialmente visible en la evolución de los sistemas de herencia. La aparición de nuevas formas de almacenar y transmitir información puede abrir nuevas posibilidades evolutivas porque permite que las modificaciones no tengan que comenzar nuevamente desde cero en cada generación. La herencia convierte determinadas soluciones del pasado en condiciones iniciales para las soluciones posteriores. La historia deja de ser únicamente una sucesión de acontecimientos y empieza a convertirse en un componente material del sistema.

La acumulación puede producirse, además, en diferentes escalas temporales. Existe una acumulación genética, desarrollada a lo largo de generaciones. Existe una acumulación fisiológica y epigenética, mediante la cual determinados estados pueden influir sobre estados posteriores. Existe una acumulación individual, producida mediante aprendizaje y memoria. Y existe una acumulación social, cuando una información puede pasar de unos individuos a otros y modificarse durante ese proceso.[5]

Estas formas no son equivalentes y no deben confundirse. La información genética no funciona del mismo modo que un recuerdo individual; un comportamiento aprendido no se transmite necesariamente de la misma manera que una secuencia de ADN; y una práctica cultural no posee las mismas propiedades hereditarias que una característica biológica. Sin embargo, todas ellas comparten una propiedad relevante para nuestra investigación: permiten que determinados efectos del pasado puedan influir sobre estados posteriores sin tener que desaparecer completamente con el individuo que los produjo.[5]

En el aprendizaje individual, por ejemplo, una experiencia modifica el organismo y hace que una situación posterior encuentre un sistema diferente. La información adquirida no se limita a describir el pasado: transforma las

condiciones desde las que el individuo afrontará el futuro. La memoria permite así que la experiencia se convierta en una modificación duradera de la capacidad de respuesta. Cuando esta capacidad de transmisión deja de estar limitada al individuo y se extiende al grupo, aparece otra posibilidad: que una modificación realizada por un individuo pueda ser aprendida por otros y utilizada como punto de partida para nuevas modificaciones. Aquí aparece la cultura acumulativa.

Los estudios sobre evolución cultural muestran que determinadas prácticas, habilidades y conocimientos pueden transmitirse socialmente y modificarse a lo largo de generaciones. En los seres humanos, esta acumulación ha alcanzado una escala extraordinaria, hasta el punto de que gran parte de nuestras capacidades tecnológicas depende de soluciones producidas por generaciones anteriores. Aprendemos de otros, transformamos lo aprendido y transmitimos posteriormente una nueva versión.[2]

No obstante, incluso en este ámbito conviene evitar simplificaciones. La acumulación cultural no es un fenómeno completamente exclusivo en todos sus componentes de nuestra especie. Existen formas de transmisión social y de modificación acumulativa en otras especies, aunque la escala, apertura y complejidad alcanzadas por la cultura humana sean extraordinarias. La investigación actual distingue precisamente entre diferentes grados y criterios de acumulación cultural, evitando considerar cualquier transmisión social como equivalente a la cultura acumulativa humana.[3]

Lo verdaderamente significativo para nuestra hipótesis es que la información puede comenzar a independizarse parcialmente de la duración biológica del individuo. Una habilidad puede sobrevivir a quien la desarrolló; una técnica puede ser reproducida por otra generación; una palabra puede atravesar siglos; una representación puede ser copiada; una herramienta puede conservar físicamente una solución encontrada mucho tiempo atrás.
La historia comienza entonces a adquirir una nueva propiedad: puede externalizarse.

Una herramienta constituye un ejemplo sencillo. El individuo que la fabrica incorpora en su forma una determinada solución a un problema. El objeto permanece después de que la acción que lo produjo haya terminado. Otro individuo puede utilizarlo, modificarlo o reproducirlo sin haber participado en su creación original. La configuración material del objeto se convierte así en soporte de una relación que fue descubierta anteriormente.

Esto permite ampliar nuestra secuencia. La información ya no tiene que permanecer únicamente dentro de un organismo. Puede encontrarse en genes, estructuras celulares, conexiones neuronales, conductas aprendidas, objetos,

lenguajes, imágenes, textos y sistemas tecnológicos. Cada soporte posee propiedades y limitaciones diferentes, pero todos permiten, en determinadas condiciones, que una configuración pueda mantenerse y volver a intervenir en procesos posteriores.
Esta externalización modifica radicalmente la relación entre información y tiempo. Mientras la memoria individual está limitada por la existencia del organismo, una inscripción puede sobrevivirlo. Mientras una habilidad depende de que alguien la conserve, una herramienta puede permanecer disponible para quien llegue después. Mientras una tradición oral depende de una cadena de transmisión humana, la escritura puede estabilizar determinados contenidos fuera de la memoria individual.

No significa que un soporte externo conserve información de manera perfecta. Todo soporte puede degradarse, perderse, ser interpretado de otra manera o resultar ilegible. Pero la posibilidad de trasladar determinadas configuraciones a otros soportes aumenta enormemente la duración potencial de la información.

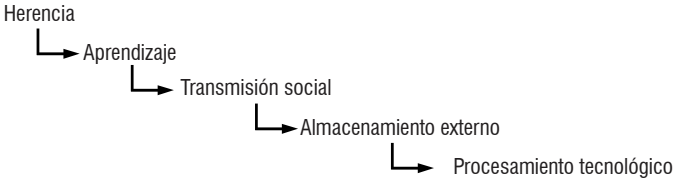
La escritura representa uno de los grandes saltos en esta dirección. El conocimiento deja de depender exclusivamente de la transmisión de memoria entre individuos y puede quedar incorporado a una estructura material relativamente estable. Posteriormente, la imprenta, la fotografía, el registro audiovisual, los sistemas informáticos y las redes digitales amplían todavía más las posibilidades de conservación y transmisión.

En este punto comienza a resultar especialmente significativa una característica de la información: su independencia relativa respecto del soporte concreto que la contiene.
Una misma relación puede expresarse mediante diferentes soportes físicos. Una palabra puede existir como sonido, como inscripción, como secuencia de caracteres digitales o como señal transmitida electrónicamente. Una imagen puede existir como pigmento, como fotografía, como archivo digital o como información reproducida en una pantalla. Lo que permanece no es la materia concreta del soporte, sino una determinada organización que puede ser reproducida mediante otros soportes.

Esto no significa que la información exista independientemente de la materia. Todo almacenamiento y toda transmisión necesitan un soporte físico. Lo que cambia es la posibilidad de trasladar una determinada configuración de un soporte a otro sin conservar necesariamente el soporte original.

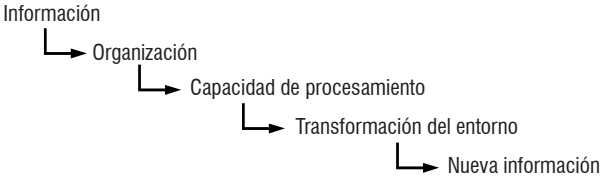
Esta propiedad abre una posibilidad que tendrá una importancia creciente en nuestro análisis: la historia de la información puede continuar incluso cuando cambian radicalmente las estructuras materiales que la contienen. La evolución biológica ofrece un primer ejemplo. La información hereditaria puede transmitirse

entre generaciones mediante organismos diferentes. La cultura ofrece otro: una práctica puede pasar de una persona a otra. La escritura ofrece un tercero: una configuración puede atravesar siglos mediante soportes materiales distintos. La tecnología moderna lleva esta capacidad a una escala completamente nueva.
Podemos representar provisionalmente esta expansión como una sucesión de soportes:



No se trata de una sustitución absoluta. Los sistemas posteriores no eliminan necesariamente los anteriores. La cultura depende de organismos biológicos; la escritura depende de personas capaces de leer y reproducirla; la tecnología depende de sistemas físicos y energéticos; y los sistemas digitales continúan necesitando materia y energía para existir.

Lo que aumenta es el número de lugares y mecanismos en los que la información puede conservarse, transformarse y combinarse. Aquí aparece otra propiedad fundamental: la información acumulada puede convertirse en condición para producir nueva información. Una solución puede permitir una herramienta mejor; una herramienta puede facilitar una nueva observación; una observación puede producir una nueva teoría; una teoría puede permitir una nueva tecnología; y esa tecnología puede abrir nuevas posibilidades de observación y transformación. La acumulación deja de ser una simple suma y comienza a comportarse como una red de dependencias históricas.
Podemos expresarlo provisionalmente mediante un ciclo:



La importancia de este ciclo no reside en que constituya una ley universal, sino en que describe una dinámica observable en determinados sistemas, especialmente en la evolución cultural y tecnológica. Una configuración informacional puede aumentar la capacidad de un sistema para actuar sobre su

entorno; esa intervención produce nuevas condiciones; y esas nuevas condiciones pueden generar información adicional.

La tecnología constituye probablemente el ejemplo más evidente de esta dinámica. Una herramienta no es únicamente un objeto material: incorpora una solución funcional. Una máquina combina numerosas soluciones anteriores. Una infraestructura tecnológica integra innumerables configuraciones heredadas de generaciones anteriores. Una red informática añade una nueva capacidad para almacenar, transmitir y transformar información.[4]

De esta manera, una parte creciente de la información humana deja de encontrarse únicamente en el organismo y comienza a estar distribuida por el entorno construido.
Este proceso introduce una diferencia fundamental respecto de la evolución biológica. La evolución genética necesita generaciones para modificar sustancialmente una población. La transmisión cultural puede producir modificaciones mucho más rápidas. La tecnología puede acelerar todavía más el proceso porque permite conservar físicamente soluciones anteriores y combinarlas con otras nuevas.

La historia humana puede contemplarse así como una progresiva expansión de los mecanismos mediante los cuales la información puede sobrevivir a los individuos que la producen. Sin embargo, esta acumulación no debe confundirse con progreso.

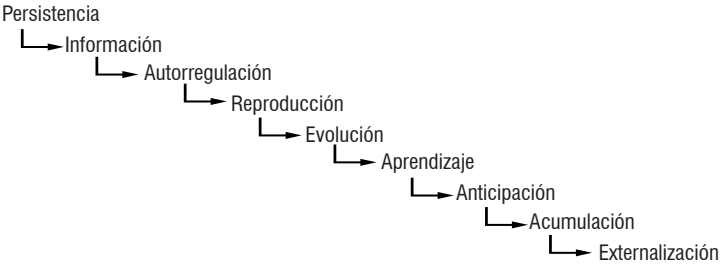
Acumular información no significa necesariamente comprender mejor, organizar mejor o vivir mejor. Una sociedad puede acumular enormes cantidades de información y utilizarla de manera destructiva. Una tecnología puede aumentar la capacidad de intervención sin aumentar proporcionalmente la capacidad de prever sus consecuencias. Un sistema puede hacerse más complejo y, al mismo tiempo, más vulnerable a determinadas perturbaciones.

La acumulación tampoco implica necesariamente una dirección hacia mayor complejidad. Puede haber pérdidas de información, simplificaciones, extinciones, olvidos y retrocesos. La evolución es un proceso histórico contingente, no una escalera ascendente. Lo que sí parece producirse en determinadas líneas evolutivas y culturales es un aumento de la capacidad para conservar, transmitir, combinar y utilizar información.

Esta formulación es deliberadamente más prudente. No afirma que toda la evolución siga esa dirección. Señala que, allí donde aparecen sistemas capaces de conservar y transmitir información con suficiente fidelidad, puede abrirse la posibilidad de construir nuevas capacidades sobre las anteriores. En los seres humanos esta dinámica alcanza una escala extraordinaria porque la información

puede circular simultáneamente por múltiples sistemas de transmisión. Los genes conservan información biológica; los individuos conservan experiencias; los grupos transmiten conocimientos y prácticas; las sociedades construyen lenguajes e instituciones; y las tecnologías almacenan y procesan configuraciones fuera del organismo. La acumulación se convierte entonces en una propiedad distribuida.
Y esta distribución tiene una consecuencia especialmente relevante para la hipótesis de este ensayo: la capacidad de organizar transformaciones ya no depende exclusivamente de la información contenida dentro de un organismo.
Una herramienta puede ampliar la capacidad física de un individuo. Una máquina puede multiplicar esa capacidad. Una infraestructura puede coordinar el trabajo de miles de máquinas. Una red informática puede distribuir información entre millones de sistemas. En cada uno de estos casos, una parte de la capacidad de transformación procede de configuraciones informacionales que han sido incorporadas previamente a estructuras materiales. Aquí aparece nuevamente la relación entre información y energía.

Una herramienta no genera energía. Una máquina tampoco. Pero ambas pueden modificar radicalmente la manera en que una cantidad de energía disponible puede ser utilizada. Una estructura determinada puede canalizar un flujo, concentrarlo, distribuirlo, almacenarlo o convertirlo en otra forma de trabajo.
La información incorporada a una organización material puede, por tanto, modificar las condiciones bajo las cuales la energía es transformada. Este punto permite comprender mejor la hipótesis que estamos desarrollando. No estamos proponiendo que la información sea una fuerza cósmica que empuje a la materia hacia una determinada dirección. Estamos preguntándonos si existe una relación general entre la aparición de sistemas capaces de conservar y procesar información y el aumento de su capacidad para organizar sus propias transformaciones energéticas y las del entorno. En los primeros organismos esta capacidad aparece limitada a la escala biológica. Con el sistema nervioso puede ampliarse mediante conducta. Con la cultura puede transmitirse socialmente. Con la tecnología puede externalizarse y materializarse fuera del organismo. La secuencia podría expresarse ahora de una manera más amplia:



Cada etapa añade una nueva posibilidad de continuidad. La información ya no solo sobrevive dentro de un organismo: puede atravesar generaciones, individuos, sociedades y soportes materiales diferentes. Y aquí aparece una pregunta que afecta directamente a la posición del ser humano dentro de esta historia. Si una de las características fundamentales de nuestra especie consiste en haber desarrollado mecanismos extraordinariamente eficaces para conservar, combinar, transmitir y utilizar información, ¿somos simplemente el resultado excepcional de una historia evolutiva concreta o representamos una fase dentro de una transformación más amplia?

La pregunta no implica que exista un destino posterior. Tampoco significa que la evolución deba conducir necesariamente hacia máquinas, inteligencia artificial u otros soportes no biológicos. No existe evidencia suficiente para afirmar semejante dirección.

Pero sí podemos observar que la información ha ido encontrando, a lo largo de la historia conocida, nuevos soportes y nuevas formas de transmisión. Desde la herencia molecular hasta la memoria individual, desde la transmisión social hasta el lenguaje, la escritura y la tecnología, se ha producido una ampliación extraordinaria de las posibilidades de conservar y utilizar configuraciones producidas anteriormente. La cuestión comienza entonces a adquirir una dimensión cósmica.

Si la vida constituye un sistema capaz de conservar información y utilizarla para mantener y reproducir su organización; si la evolución permite acumular modificaciones a través de generaciones; si determinados organismos desarrollan aprendizaje y anticipación; y si algunas especies pueden externalizar información en objetos, lenguajes y tecnologías, entonces podría existir una continuidad funcional entre la historia de la vida y la historia de los sistemas capaces de transformar su entorno mediante información.

No sabemos si esa continuidad representa una característica general de la materia organizada o una particularidad de la vida terrestre. Tampoco sabemos si la aparición de sistemas tecnológicos capaces de almacenar y procesar información fuera de los organismos constituye el comienzo de una nueva etapa o simplemente una peculiaridad histórica de nuestra especie. Pero la pregunta puede formularse con mayor precisión.

¿Puede la acumulación de información aumentar progresivamente la capacidad de determinados sistemas para organizar sus transformaciones y, con ello, ampliar los soportes en los que esa información puede conservarse y seguir acumulándose?
Si la respuesta fuera afirmativa, la historia de la información no terminaría necesariamente con el organismo que la originó. Podría desplazarse entre

soportes, reorganizarse y adquirir nuevas formas de continuidad. La humanidad podría ser entonces no el destino de ese proceso, sino uno de sus episodios conocidos. Y esta posibilidad nos conduce directamente al siguiente problema: si la información puede acumularse hasta modificar profundamente la capacidad de un sistema para transformar su entorno, ¿en qué momento esa capacidad deja de ser simplemente acumulación y pasa a convertirse en organización activa de la energía?

Referencias al Capítulo VI

[1] Jablonka & Szathmáry (1995) Almacenamiento, herencia y transmisión de información.
[2] Fuente específica sobre cultura acumulativa humana.
[3] Fuente específica sobre transmisión social y acumulación cultural en otras especies.
[4] Fuente específica sobre acumulación y evolución tecnológica.
[5] Jablonka & Szathmáry (1995) Almacenamiento, herencia y transmisión de información.

CAPITULO VII

La Inteligencia Como Organizador de Energía

La acumulación de información no conduce automáticamente a la inteligencia. Un sistema puede conservar enormes cantidades de información sin ser capaz de integrarla, interpretarla o utilizarla para modificar de manera flexible su relación con el entorno. La cuestión que aparece ahora es, por tanto, diferente: ¿qué sucede cuando la información acumulada puede relacionarse de tal manera que permita comparar posibilidades, anticipar consecuencias y seleccionar entre diferentes formas de actuación?

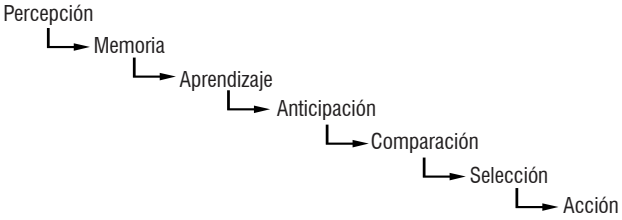
En los capítulos anteriores hemos seguido una progresión funcional. La persistencia permite conservar efectos del pasado; la información permite que esas diferencias intervengan en procesos posteriores; la autorregulación utiliza determinadas informaciones para mantener la organización; la reproducción permite transmitirlas; la evolución acumula modificaciones; el aprendizaje incorpora experiencia individual; y la anticipación permite modificar el presente en función de condiciones futuras posibles. La inteligencia aparece cuando estas capacidades pueden integrarse en una organización suficientemente compleja como para utilizar información no solo para conservarse o responder, sino también para construir posibilidades y orientar acciones.

Esta definición requiere una precisión. No estamos utilizando aquí inteligencia como sinónimo de conciencia, lenguaje, razonamiento abstracto o inteligencia humana. Tampoco pretendemos establecer un momento exacto en el que la evolución «creó» la inteligencia. Utilizamos el término en un sentido funcional: la capacidad de un sistema para integrar información, construir representaciones o relaciones sobre estados posibles y utilizar esas relaciones para seleccionar y modificar su comportamiento.

La investigación sobre cognición animal ha utilizado definiciones próximas a esta idea, entendiendo los procesos cognitivos como mecanismos neuronales relacionados con la adquisición, retención y utilización de información. [3] Al mismo tiempo, la biología evolutiva ha mostrado que los mecanismos de procesamiento de información deben entenderse en relación con el entorno concreto en el que evolucionaron: una solución que resulta adaptativa en determinadas condiciones no tiene por qué ser óptima fuera de ellas. [4]

La diferencia fundamental respecto de los niveles anteriores no consiste, por tanto, en poseer información, sino en establecer relaciones funcionales entre

informaciones diferentes. La memoria conserva; la percepción detecta; el aprendizaje modifica; la anticipación proyecta posibilidades; la inteligencia integra estas capacidades y puede utilizarlas para seleccionar entre alternativas. Podemos representar esta integración de forma provisional:



Esta secuencia tampoco debe interpretarse como una escalera evolutiva universal. Existen organismos con capacidades parciales y combinaciones muy diferentes de estos mecanismos. Lo que nos interesa es identificar una propiedad funcional: cuando un sistema puede utilizar información sobre estados anteriores y posibles estados futuros para modificar la acción presente, aumenta su capacidad de intervenir sobre el curso de los acontecimientos.
En los organismos dotados de sistemas nerviosos, esta capacidad adquiere una dimensión nueva. La percepción permite obtener información del entorno; la memoria conserva determinados resultados; el aprendizaje modifica las respuestas; y los mecanismos predictivos permiten evaluar posibilidades antes de ejecutar una acción. La conducta deja así de depender exclusivamente de una respuesta inmediata ante el estado presente del mundo.

Esto no significa que el organismo construya una representación perfecta de la realidad. Toda percepción es necesariamente parcial y toda predicción está limitada por la información disponible y por la incertidumbre del entorno. Precisamente por ello, la inteligencia puede entenderse menos como posesión de conocimiento absoluto que como capacidad para tomar decisiones bajo condiciones de información incompleta.

Desde esta perspectiva, una de las propiedades fundamentales de la inteligencia es la posibilidad de intervenir sobre el presente antes de conocer completamente el resultado de la acción. El organismo puede seleccionar una respuesta porque determinadas experiencias anteriores permiten estimar qué consecuencias son más probables. La acción deja de ser exclusivamente una reacción y se convierte progresivamente en una intervención orientada por posibilidades. Esta capacidad tiene una consecuencia energética.
Todo organismo necesita transformar materia y energía para mantenerse. La actividad metabólica, el movimiento, la reparación, el crecimiento y la reproduc-

ción implican intercambios materiales y energéticos. La termodinámica no desaparece cuando aparece la inteligencia; al contrario, continúa imponiendo las condiciones dentro de las cuales cualquier sistema biológico puede funcionar. Los organismos son sistemas abiertos y necesitan flujos continuos de energía para mantener su organización.

La información interviene en este proceso porque permite regular esas transformaciones. Un sistema biológico no necesita únicamente disponer de energía: necesita distribuir recursos, regular procesos, responder a perturbaciones y mantener determinadas variables dentro de rangos compatibles con su funcionamiento. La homeostasis depende precisamente de mecanismos de control que procesan información sobre el estado interno y el entorno. [1]

Aquí debemos introducir una distinción esencial. La información no es energía. Tampoco crea energía ni permite eludir el coste termodinámico de las transformaciones. Una decisión inteligente no produce trabajo físico de la nada. Lo que puede hacer es modificar la organización mediante la cual una cantidad de energía disponible será utilizada. [5]

La diferencia puede expresarse de manera sencilla: la energía proporciona capacidad para realizar transformaciones; la organización determina cómo se relacionan esas transformaciones; y la información puede participar en la regulación y selección de esas relaciones.

En los sistemas biológicos esta interacción es observable a diferentes escalas. Las redes bioquímicas regulan reacciones y flujos; los organismos coordinan procesos fisiológicos; los sistemas nerviosos coordinan percepción, acción y aprendizaje. En todos estos casos existen costes energéticos asociados al funcionamiento de los mecanismos que realizan esas tareas. La termodinámica de los sistemas bioquímicos estudia precisamente cómo la disipación de energía y los costes energéticos condicionan la función biológica, incluyendo relaciones entre precisión, velocidad y gasto energético. [2]

La aparición de la inteligencia no elimina estos costes. Lo que introduce es una capacidad adicional para utilizar información con el fin de modificar la trayectoria de las transformaciones.

Podemos imaginar una situación sencilla. Dos organismos disponen de recursos energéticos semejantes, pero uno puede anticipar la localización de esos recursos y el otro no. El primero puede desplazarse hacia ellos, evitar recorridos innecesarios, modificar su comportamiento ante señales ambientales y preparar determinadas respuestas. No dispone de más energía por el hecho de poseer esa información. Dispone de una organización que puede dirigir de manera diferente la energía de la que dispone.

Esta diferencia adquiere una importancia creciente cuando las capacidades de anticipación y planificación se amplían. Un animal que selecciona una ruta antes de recorrerla está utilizando información para organizar una secuencia de transformaciones futuras. Un organismo que prepara fisiológicamente una respuesta antes de una perturbación está haciendo algo semejante a otra escala. En ambos casos, la información interviene en la organización temporal de la actividad.

En los sistemas nerviosos complejos esta capacidad puede alcanzar niveles extraordinarios. El organismo puede integrar diferentes fuentes de información, comparar situaciones actuales con experiencias anteriores, representar acciones posibles y seleccionar entre ellas. La conducta puede convertirse así en una forma de intervención anticipada sobre el entorno.

Aquí aparece una diferencia cualitativa respecto de la simple acumulación de información. Una biblioteca contiene información, pero no actúa por sí misma. Un organismo puede poseer una cantidad relativamente limitada de información y, sin embargo, utilizarla para modificar su comportamiento de manera flexible. Lo decisivo no es únicamente cuánto se conserva, sino qué relaciones pueden establecerse entre los elementos conservados y qué capacidad de acción proporcionan esas relaciones.

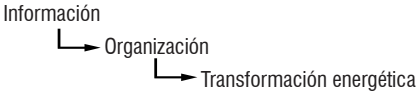
Esta distinción resulta especialmente importante para nuestra hipótesis porque impide identificar acumulación con progreso. Más información no significa necesariamente más inteligencia. Una mayor cantidad de datos puede incluso aumentar la dificultad de seleccionar aquello que resulta relevante. La capacidad decisiva es la integración funcional.

La inteligencia puede entenderse entonces como una nueva forma de organización de la información. No porque la información adquiera una naturaleza diferente, sino porque aumenta la capacidad del sistema para combinarla, evaluarla y utilizarla en función de diferentes posibilidades. A partir de aquí podemos observar una nueva transformación histórica: la inteligencia no solo organiza la actividad interna del organismo, sino que puede comenzar a organizar el entorno.

El uso de herramientas constituye uno de los primeros ejemplos evidentes. Una herramienta incorpora una relación funcional previamente descubierta y permite reproducirla posteriormente. El organismo no tiene que realizar directamente toda la transformación física: puede utilizar un objeto cuya configuración ya contiene parte de la solución.

Una piedra modificada para cortar, una palanca, una rueda o un mecanismo de transmisión no generan energía por sí mismos. Lo que hacen es modificar las

condiciones en las que una fuerza disponible puede aplicarse. Una herramienta puede multiplicar, concentrar, orientar o transformar la acción física del organismo. La tecnología lleva este principio mucho más lejos. Una máquina puede incorporar una secuencia de transformaciones que anteriormente requería la intervención directa de numerosas personas. Una infraestructura puede coordinar miles de máquinas. Una red eléctrica puede distribuir energía a grandes distancias. Un ordenador puede procesar información y controlar procesos físicos de acuerdo con reglas previamente establecidas.
En todos estos casos aparece una continuidad conceptual:



Una configuración informacional puede incorporarse a una estructura material; esa estructura puede modificar el modo en que se producen determinadas transformaciones; y esas transformaciones pueden generar nuevas condiciones para adquirir o procesar información.

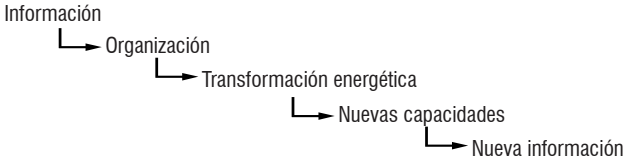
Esto no significa que toda tecnología sea necesariamente más eficiente ni que toda organización tecnológica reduzca el consumo energético. De hecho, determinadas tecnologías aumentan enormemente el consumo total de energía aunque mejoren la eficiencia de procesos concretos. Por eso debemos distinguir entre eficiencia local y consumo global.

Una máquina puede realizar una tarea con menos energía por unidad de producto y, al mismo tiempo, provocar un aumento enorme del consumo total porque hace posible multiplicar la cantidad de productos fabricados. La inteligencia tecnológica puede aumentar la capacidad de intervención sobre la energía sin que ello implique necesariamente una reducción de su utilización.

Esta distinción resulta fundamental para evitar una conclusión equivocada. No estamos diciendo que la evolución conduzca hacia sistemas que consumen cada vez menos energía. Estamos proponiendo algo diferente: que determinados sistemas pueden desarrollar una capacidad creciente para organizar y controlar transformaciones energéticas mediante información.

La historia tecnológica permite observar esta expansión de la capacidad de organización. Las herramientas amplían la acción física; las máquinas automatizan secuencias; las infraestructuras coordinan flujos; los sistemas informáticos controlan procesos complejos; las redes conectan múltiples centros de procesamiento.

La información deja así de ser exclusivamente una propiedad funcional del organismo y comienza a quedar incorporada en estructuras externas capaces de transformar el entorno. Esta externalización introduce una nueva etapa. Una solución que antes necesitaba permanecer en la memoria de un individuo puede quedar incorporada a una herramienta. Una secuencia de instrucciones puede quedar incorporada a una máquina. Un conjunto de decisiones puede convertirse en un programa. Un conocimiento puede quedar almacenado en una infraestructura tecnológica.
El organismo ya no necesita contener físicamente toda la información necesaria para realizar una determinada transformación.
Aquí vuelve a aparecer el ciclo que encontramos en el capítulo anterior:



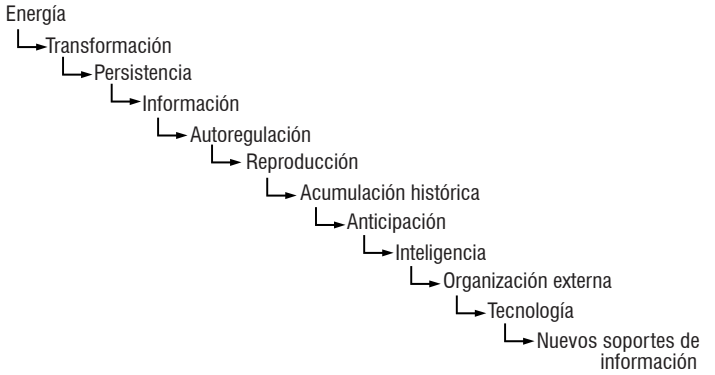
Una nueva capacidad de transformación permite explorar nuevas condiciones; esas condiciones producen nuevos datos; los nuevos datos permiten construir nuevas soluciones; y esas soluciones pueden volver a incorporarse a estructuras materiales.

No sabemos si este ciclo constituye una propiedad general de la evolución o si representa únicamente una dinámica particular de la vida terrestre. Tampoco sabemos si su expansión tecnológica representa una continuación inevitable de la evolución biológica. Lo que sí podemos observar es que, en nuestra especie, la información ha adquirido una capacidad creciente para intervenir sobre transformaciones físicas que anteriormente dependían directamente de la acción biológica.
La cuestión se vuelve todavía más interesante cuando aparecen sistemas artificiales capaces de procesar información de manera independiente del sistema nervioso humano.

Un ordenador no necesita comprender una operación matemática del mismo modo que la comprende una persona para realizarla. Un sistema automático puede regular una máquina, clasificar señales, optimizar determinadas operaciones o modificar una respuesta siguiendo reglas y modelos establecidos. La aparición de estos sistemas amplía nuevamente el espacio en el que la información puede ser procesada y utilizada para dirigir transformaciones físicas.
Pero aquí debemos mantener una distinción fundamental: procesamiento de información no equivale automáticamente a conciencia ni a inteligencia de tipo

humano. La existencia de sistemas artificiales capaces de realizar tareas complejas no demuestra por sí misma que posean experiencia subjetiva, autoconciencia o comprensión comparable a la humana. Lo que sí demuestra es algo más limitado y relevante para nuestra hipótesis: parte de las funciones que anteriormente dependían exclusivamente de sistemas biológicos pueden ser implementadas, al menos parcialmente, en soportes artificiales.

Esto abre una posibilidad que no debemos convertir todavía en una conclusión. Si la información puede pasar de los genes a los organismos, de los organismos a las sociedades y de las sociedades a estructuras tecnológicas, entonces quizá su historia no esté necesariamente vinculada a un único tipo de soporte.
Podríamos estar observando una ampliación progresiva de los medios mediante los cuales determinados sistemas conservan, procesan y utilizan información para modificar sus transformaciones.
La secuencia provisional que hemos construido adquiere ahora una nueva forma:



Pero debemos detenernos aquí y recordar qué tipo de afirmación estamos haciendo. Esta secuencia no es una ley científica demostrada. No afirma que todo el universo deba recorrer estas etapas ni que exista una finalidad inscrita en la materia. Tampoco afirma que la inteligencia humana constituya el punto culminante de la evolución. Es una reconstrucción conceptual destinada a explorar una posible continuidad funcional entre diferentes capacidades que aparecen en sistemas vivos y tecnológicos.

La hipótesis más fuerte que podemos formular a partir de lo observado es otra: quizá una característica importante de determinadas trayectorias evolutivas sea el aumento de la capacidad de conservar, combinar, transmitir y utilizar información para modificar las transformaciones del sistema y de su entorno.

Si esto fuera correcto, la inteligencia no sería un fenómeno completamente separado de la historia anterior de la vida. Sería una ampliación de capacidades mucho más antiguas: conservar diferencias, utilizar información, aprender de la experiencia, anticipar condiciones futuras y seleccionar respuestas.
Y entonces la relación entre inteligencia y energía adquiriría un significado más preciso. La inteligencia no sería una fuente de energía ni una fuerza que impulse físicamente la materia. Sería una capacidad para utilizar información con el fin de organizar posibilidades de transformación. Allí donde existe energía disponible, la organización determina qué transformaciones son posibles y cómo pueden encadenarse; la información puede intervenir en esa organización; y la inteligencia puede ampliar extraordinariamente la capacidad de seleccionar entre diferentes alternativas. Esta formulación nos permite regresar a la pregunta inicial del libro.

Si la materia puede organizarse en sistemas capaces de conservar información; si algunos de esos sistemas pueden utilizarla para anticipar; si la acumulación de información permite construir nuevas capacidades; y si esas capacidades pueden llegar a modificar físicamente el entorno mediante herramientas y tecnologías, entonces quizá la vida y la inteligencia no sean únicamente episodios aislados de la historia de la materia.
Podrían representar diferentes niveles de una misma posibilidad funcional: la capacidad de un sistema para conservar información sobre su historia y utilizarla para aumentar su capacidad de organizar sus propias transformaciones. Pero todavía no sabemos si esta posibilidad es exclusiva de la Tierra.

Tampoco sabemos si la aparición de inteligencia constituye una rareza extraordinaria, una consecuencia probable bajo determinadas condiciones o una fase que puede repetirse allí donde la materia disponga de suficiente estabilidad, energía y capacidad para conservar y procesar información.
Esa será la pregunta del capítulo siguiente:
¿somos una excepción de la evolución terrestre o una fase potencialmente repetible de la organización de la materia mediante información?

Referencias al Capítulo VII

[1] Mizraji, E. (2024). Homeostasis and information processing: The key frames for the thermodynamics of biological systems. Biosystems, 236, 105115.
[2] Tu, Y. (2026). Nonequilibrium Thermodynamics for Biochemical Networks: Energetic Principles of Cellular Function. Annual Review of Biophysics, 55, 225–252.
[3] Dukas, R. (2004). Evolutionary Biology of Animal Cognition. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 35, 347–374.
[4] Trimmer, P. C., et al. (2014). An Evolutionary Perspective on Information Processing. Topics in Cognitive Science.
[5] Ehrich, J. & Sivak, D. A. (2023). Energy and information flows in autonomous systems. Frontiers in Physics, 11.

CAPITULO VIII

¿Somos una excepción o una fase?

Hasta ahora hemos seguido una posible trayectoria que comienza con la transformación de la energía y pasa por la persistencia, la conservación de información, la autorregulación, la reproducción, la acumulación histórica, la anticipación y, finalmente, la inteligencia y la capacidad tecnológica para modificar el entorno. Esta trayectoria no ha sido presentada como una ley universal, sino como una reconstrucción funcional que permite formular una pregunta más amplia: si la aparición de sistemas capaces de conservar y utilizar información ha sido posible una vez, ¿debemos considerar que somos una excepción extraordinariamente improbable o que representamos una posibilidad que podría repetirse en otros lugares?

La pregunta parece sencilla, pero contiene una dificultad fundamental. Solo conocemos un ejemplo de vida: la Tierra. No disponemos de una segunda biosfera con la que comparar nuestra historia, ni sabemos cuántas veces puede haber surgido la vida en el universo, con qué frecuencia aparece la complejidad biológica o qué probabilidad existe de que una evolución biológica llegue a producir sistemas tecnológicos. La astrobiología estudia precisamente estas cuestiones, pero la ausencia de un segundo ejemplo limita inevitablemente nuestras conclusiones. Hasta ahora, la Tierra continúa siendo el único mundo conocido que alberga vida. [1]

Esta situación produce una paradoja epistemológica. Necesitamos conocer otros mundos para determinar hasta qué punto nuestra historia es excepcional, pero precisamente porque todavía no hemos encontrado vida fuera de la Tierra no podemos utilizar la comparación para establecer su frecuencia.

La existencia de miles de exoplanetas ha transformado, sin embargo, el problema. Ya no preguntamos únicamente si existen otros planetas, sino qué diversidad de condiciones planetarias puede existir y cuáles de ellas podrían permitir la aparición y persistencia de sistemas vivos. La investigación actual contempla una variedad mucho mayor de ambientes potencialmente habitables que la que podía imaginarse hace unas décadas. Pero habitabilidad y vida no son sinónimos. Un planeta puede reunir determinadas condiciones compatibles con la vida sin que ello implique que la vida haya aparecido realmente en él. [2]

Esta diferencia es esencial para nuestra hipótesis. Si la vida surgiera con relativa facilidad siempre que determinadas condiciones físicas y químicas estuvieran

presentes, entonces sería razonable pensar que el fenómeno podría repetirse numerosas veces. Si, por el contrario, el paso desde la química no biológica hasta el primer sistema vivo requiriera una combinación extremadamente improbable de acontecimientos, la existencia de vida podría ser mucho más excepcional. No conocemos todavía la respuesta.

Tampoco conocemos si la aparición de la primera forma de vida constituye la principal dificultad o si las mayores barreras aparecen posteriormente. Podría ser relativamente frecuente que surgieran sistemas capaces de mantener algún tipo de organización química, pero extraordinariamente difícil que estos alcanzaran reproducción estable, evolución abierta, multicelularidad, sistemas nerviosos o capacidades cognitivas avanzadas. También podría ocurrir lo contrario. Sin una segunda historia biológica, no podemos determinar dónde se encuentran realmente los principales filtros evolutivos.

La historia terrestre muestra, además, que la vida no evolucionó siguiendo una trayectoria lineal hacia la inteligencia. Durante la mayor parte de la historia del planeta, la vida estuvo constituida principalmente por organismos microbianos, y estos organismos participaron activamente en la transformación de los ciclos biogeoquímicos y del propio planeta. [3] La aparición posterior de organismos complejos no convierte las etapas anteriores en simples escalones destinados a conducir hasta nosotros.

Esto obliga a reconsiderar la idea de progreso evolutivo. La evolución no parece poseer una dirección general hacia una forma determinada de complejidad. Las especies aparecen, se diversifican, se adaptan, desaparecen o permanecen durante enormes periodos de tiempo. La complejidad puede aumentar en determinadas líneas evolutivas, pero también puede reducirse cuando una estructura más sencilla resulta funcionalmente suficiente.

Por ello, si la inteligencia constituye una posibilidad evolutiva relevante, no debemos interpretarla como el destino inevitable de la vida. La Tierra podría haber permanecido habitada durante miles de millones de años sin que apareciera una especie capaz de desarrollar tecnología. De hecho, la inteligencia tecnológica que conocemos es extremadamente reciente en comparación con la antigüedad de la biosfera. Algunos análisis de la historia evolutiva subrayan precisamente la extraordinaria recencia de las condiciones que precedieron a nuestra aparición. [4]

Esta observación tiene una consecuencia importante para el modelo que estamos construyendo.

La secuencia: persistencia - información - autorregulación - reproducción - acumulación histórica - anticipación - inteligencia, no implica que cada etapa

conduzca necesariamente a la siguiente. La aparición de una capacidad puede abrir nuevas posibilidades sin convertirlas en inevitables. Podemos imaginar, por tanto, una enorme cantidad de historias evolutivas posibles. En algunas, la vida podría permanecer durante miles de millones de años en formas relativamente simples. En otras, podrían aparecer organismos multicelulares pero no sistemas nerviosos complejos. En otras podrían aparecer capacidades cognitivas avanzadas sin que llegara a producirse una civilización tecnológica. Y solo algunas podrían alcanzar una situación semejante a la nuestra.

Si esto fuera así, nuestra existencia no demostraría que la evolución conduce hacia la inteligencia. Demostraría únicamente que, bajo determinadas condiciones, esa trayectoria es posible. Pero aquí aparece una cuestión todavía más interesante.

Si la aparición de inteligencia fuera extremadamente improbable, podríamos considerar a la humanidad una singularidad evolutiva. Si, por el contrario, determinadas condiciones favorecen repetidamente la aparición de sistemas capaces de procesar información de forma cada vez más compleja, nuestra existencia podría representar una fase que también aparece en otras historias evolutivas. No sabemos cuál de las dos posibilidades es correcta.

La investigación astrobiológica ha planteado durante décadas precisamente esta cuestión: qué factores determinan la aparición de inteligencia y de civilizaciones tecnológicas y hasta qué punto podemos inferir su frecuencia a partir de una única historia terrestre. El problema no consiste únicamente en saber cuántos planetas pueden ser habitables, sino en determinar qué probabilidad existe de que una biosfera llegue a producir organismos capaces de desarrollar tecnología. [5]

Nuestra hipótesis introduce una tercera posibilidad entre la excepcionalidad absoluta y la inevitabilidad. Tal vez la aparición de inteligencia no sea ni un accidente único ni una consecuencia obligatoria. Podría ser una posibilidad emergente que depende de una combinación de condiciones: disponibilidad energética, estabilidad ambiental suficiente, capacidad de conservar información, reproducción, acumulación histórica, interacción con el entorno y presión selectiva hacia nuevas formas de regulación y anticipación.

En ese caso, no existiría una finalidad evolutiva, pero sí podrían existir determinadas condiciones bajo las cuales ciertas capacidades se vuelven funcionalmente ventajosas y, por tanto, evolutivamente recurrentes. Esto modificaría también nuestra interpretación de la tecnología.

La tecnología humana no tendría por qué representar necesariamente el punto culminante de la evolución. Podría constituir una transición. Una especie

biológica puede utilizar herramientas para ampliar sus capacidades; las herramientas pueden convertirse en máquinas; las máquinas pueden integrar sistemas de información; y estos sistemas pueden adquirir una autonomía creciente respecto de las estructuras biológicas que los originaron. No sabemos hasta dónde puede llegar esta transición. Tampoco sabemos si otras civilizaciones, suponiendo que existan, recorrerían una trayectoria tecnológica semejante. Podrían desarrollar tecnologías completamente diferentes. Podrían utilizar soportes materiales distintos. Podrían permanecer biológicamente limitadas durante toda su existencia. Podrían desaparecer antes de alcanzar una transformación tecnológica profunda. Incluso podrían desarrollar sistemas de procesamiento de información que no reconozcamos como inteligencia cuando busquemos señales de ellas.

Por eso la búsqueda de vida extraterrestre no debería limitarse exclusivamente a buscar organismos parecidos a los terrestres. Nuestra propia definición de vida está construida a partir de un único ejemplo, y la astrobiología reconoce que incluso determinar qué debe considerarse vida no es una cuestión completamente cerrada. [1]

Esto resulta especialmente importante para nuestra hipótesis sobre la información. Si la conservación y utilización de información constituyen propiedades funcionalmente importantes de los sistemas vivos, quizá podamos encontrar sistemas que presenten algunas de esas propiedades sin reproducir exactamente la arquitectura biológica terrestre.

Pero tampoco debemos convertir esta posibilidad en una afirmación. La información no constituye una sustancia independiente de la materia. Siempre necesita un soporte físico. Por ello, incluso si existieran sistemas radicalmente diferentes de la vida terrestre, tendrían que estar sometidos a las condiciones físicas del universo. Lo que podría cambiar sería la forma concreta en que la información se conserva, se transmite, se procesa y se utiliza. Aquí aparece nuevamente la cuestión de la inteligencia artificial.

En la Tierra ya existen sistemas no biológicos capaces de procesar información, aprender determinadas regularidades y realizar tareas que anteriormente requerían capacidades humanas. Esto demuestra que algunas funciones asociadas al procesamiento complejo de información pueden implementarse en soportes artificiales. No demuestra, sin embargo, que esos sistemas posean conciencia ni que constituyan una nueva forma de vida.

La distinción es esencial. La existencia de procesamiento artificial de información no prueba la existencia de una inteligencia consciente no biológica. Tampoco demuestra que la evolución tecnológica vaya a sustituir a la biológica. Solo demuestra que determinadas funciones informacionales no tienen por qué

permanecer exclusivamente dentro de un organismo. Esta posibilidad puede adquirir una dimensión cósmica. Si una civilización tecnológica pudiera construir sistemas capaces de conservar, transmitir y procesar información durante periodos mucho mayores que la vida individual de sus organismos, una parte de la historia informacional de esa civilización podría sobrevivir a sus propios creadores. La información podría quedar incorporada a máquinas, archivos, redes o sistemas autónomos.

No sabemos si algo semejante ocurre o ha ocurrido fuera de la Tierra. Pero la posibilidad obliga a ampliar nuestra concepción de lo que significa que una evolución continúe. Quizá la evolución de la información no tenga que coincidir permanentemente con la evolución biológica. La evolución biológica utiliza organismos como soportes de herencia, regulación y acumulación histórica. La evolución cultural utiliza cerebros, lenguaje, sociedades y herramientas. La evolución tecnológica incorpora progresivamente máquinas, redes y sistemas artificiales. No son procesos equivalentes, pero todos comparten una propiedad funcional: permiten conservar determinadas configuraciones y utilizarlas para generar estados posteriores.

Si esta continuidad fuera relevante, la aparición de tecnología podría representar un cambio de soporte más que una ruptura absoluta. Pero nuevamente debemos evitar la tentación de convertir una posibilidad en una dirección necesaria. No sabemos si la tecnología sobrevivirá a la especie humana. No sabemos si una civilización tecnológica puede mantenerse durante periodos cósmicamente largos. No sabemos si la inteligencia tiende a aumentar indefinidamente ni si una mayor capacidad de procesamiento conduce necesariamente a sistemas más estables.

De hecho, la propia tecnología introduce nuevas vulnerabilidades. Cuanto más compleja es una red de dependencias, más posibilidades existen de que determinadas alteraciones afecten a todo el sistema. La capacidad para transformar el entorno puede aumentar al mismo tiempo que aumenta la capacidad para destruir las condiciones que permiten mantener esa transformación.

Esta tensión resulta especialmente importante para nuestra hipótesis. Si la inteligencia aumenta la capacidad de organizar transformaciones energéticas, también aumenta la capacidad de modificar el entorno a escalas mayores. La organización puede producir estabilidad, pero también puede producir inestabilidad cuando las transformaciones superan la capacidad de regulación del sistema.

Por ello, una eventual evolución hacia formas más complejas de procesamiento de información no puede identificarse automáticamente con progreso. Puede

aumentar la capacidad. La dirección que adopte esa capacidad dependerá de las condiciones en las que sea utilizada. Desde esta perspectiva, quizá la cuestión más interesante no sea preguntar si el universo "produce" inteligencia, sino si las condiciones físicas que permiten conservar y procesar información hacen posible que aparezcan, de manera recurrente, sistemas capaces de aumentar su capacidad de organización.

Esta formulación elimina cualquier necesidad de atribuir una finalidad al universo. No sería necesario afirmar que la materia "busca" producir vida, inteligencia o tecnología. Bastaría con investigar si existen condiciones bajo las cuales determinadas configuraciones tienen mayor capacidad para conservar su organización, reproducirse, acumular información y modificar las condiciones de su propia existencia. Si esas condiciones fueran suficientemente generales, la vida podría ser una posibilidad recurrente.

Si además algunas trayectorias evolutivas condujeran hacia sistemas capaces de acumular información de manera extraordinariamente eficaz, la inteligencia podría aparecer también en más de un lugar. Y si finalmente algunas de esas inteligencias desarrollaran tecnología, podría existir una continuidad todavía más amplia entre evolución biológica, evolución cultural y evolución tecnológica. Pero todo esto sigue siendo una hipótesis.

La Tierra continúa siendo nuestro único ejemplo. No sabemos si somos la primera manifestación de inteligencia tecnológica del universo, una de muchas, una rareza irrepetible o simplemente una de las formas posibles que puede adoptar la organización de la materia cuando dispone de energía y tiempo suficientes.

Tampoco sabemos si la vida constituye una etapa necesaria para alcanzar formas avanzadas de procesamiento de información. Quizá sí. Quizá existan otros caminos que todavía no podemos imaginar. Incluso dentro de la vida terrestre, la inteligencia no parece haber sido una consecuencia inevitable. Solo una especie conocida ha construido una civilización tecnológica capaz de transformar el planeta a escala global, y la aparición de esta capacidad se concentra en una fracción diminuta de la historia de la vida. [4]

Por eso quizá sea más prudente hablar de fase potencial que de destino. Una fase potencial no es una etapa obligatoria. Es una posibilidad que puede aparecer bajo determinadas condiciones y que puede desaparecer sin completar ninguna trayectoria posterior.
Desde esta perspectiva, podríamos considerar al ser humano como una especie que ha alcanzado provisionalmente una determinada capacidad de organización de información y energía, sin saber todavía si esa capacidad representa un punto excepcional, una transición o una manifestación repetible.

La diferencia entre estas posibilidades no podrá resolverse mediante razonamientos filosóficos aislados. Necesitará observaciones.
El descubrimiento de una segunda génesis sería una evidencia extraordinariamente importante. No demostraría por sí solo que la vida sea inevitable, pero modificaría radicalmente nuestra estimación de su frecuencia. Si encontráramos vida independiente en otro lugar del sistema solar, especialmente si hubiera surgido de manera completamente separada de la biosfera terrestre, tendríamos por primera vez una comparación directa entre dos historias biológicas. Y si encontráramos vida en varios lugares, la hipótesis de la recurrencia adquiriría todavía mayor fuerza.

Algo semejante ocurriría con la inteligencia. Encontrar una segunda civilización tecnológica no demostraría que la inteligencia sea inevitable, pero demostraría que nuestra trayectoria no es única. La diferencia entre ambas cuestiones es fundamental. Encontrar vida demostraría que la vida puede aparecer al menos más de una vez. Encontrar inteligencia tecnológica demostraría que también esa transición puede repetirse. Cada nuevo ejemplo reduciría nuestra incertidumbre.
Pero mientras esos ejemplos no existan, debemos resistir dos tentaciones opuestas: considerar que somos necesariamente únicos porque no hemos encontrado a nadie, o considerar que necesariamente existen otros porque el universo es enorme.

Ninguna de las dos conclusiones está justificada por la evidencia disponible. El tamaño del universo aumenta enormemente el número de lugares posibles, pero no proporciona por sí mismo la probabilidad de que la vida aparezca. Del mismo modo, la ausencia de detección no demuestra que no exista vida. Solo establece que todavía no disponemos de evidencia confirmada de ella. [1]

Aquí nuestra hipótesis vuelve a encontrarse con el problema central del libro. Si la vida fuera una excepción absoluta, entonces la cadena que hemos construido podría ser simplemente la historia singular de un planeta concreto. Si, en cambio, la vida surgiera de manera relativamente frecuente allí donde determinadas condiciones estuvieran presentes, la cadena podría representar una dinámica más general de la materia.

Y si además encontráramos que la conservación de información, la autorregulación, la acumulación histórica y la capacidad de anticipación aparecen repetidamente en diferentes sistemas vivos, entonces la hipótesis de una continuidad funcional entre información, organización y transformación energética adquiriría un interés mucho mayor. Todavía más significativa sería la aparición independiente de inteligencia tecnológica. Entonces podríamos comenzar a preguntarnos si la inteligencia constituye una propiedad que emerge recurrentemente cuando la evolución alcanza determinados niveles de integración informacional, o si nuestra historia representa una singularidad cuya

repetición es extraordinariamente improbable. La respuesta tendría consecuencias profundas para nuestra posición dentro del universo. Pero incluso si descubriéramos que la inteligencia aparece muchas veces, eso no convertiría a la inteligencia en el destino del universo. Solo demostraría que determinadas condiciones pueden producirla. Del mismo modo, descubrir vida en muchos mundos no demostraría que el universo tenga como finalidad la vida. Solo demostraría que la vida puede emerger bajo determinadas condiciones.

Esta diferencia entre posibilidad, recurrencia y finalidad debe mantenerse hasta el final de nuestra investigación. Quizá seamos una excepción. Quizá seamos una fase. Quizá seamos una de muchas manifestaciones de un proceso todavía más amplio. Por ahora no podemos decidir entre estas posibilidades. Pero podemos formular una pregunta más precisa que las anteriores:
¿Existe alguna relación física general por la cual la materia, cuando dispone de energía y capacidad suficiente para conservar y procesar información, pueda generar progresivamente sistemas capaces de organizar con mayor eficacia sus propias transformaciones?

Esta pregunta no afirma que la respuesta sea afirmativa. Solo determina qué deberíamos investigar si queremos saber si nuestra historia puede tener una dimensión más general. El siguiente capítulo llevará esta cuestión más lejos. Si la vida y la inteligencia pueden ser entendidas como etapas posibles dentro de una creciente capacidad para conservar, procesar y utilizar información, tendremos que preguntarnos qué podría suceder en escalas temporales mucho mayores que las de una especie, una civilización o incluso un planeta. La pregunta ya no será solamente si somos una excepción. Será qué puede ocurrir cuando información, energía y organización continúan interactuando durante tiempos cósmicos.

Referencias del capítulo VIII

[1] NASA Astrobiology. About Astrobiology: Life, Here and Beyond. NASA Astrobiology. La página señala que la Tierra sigue siendo el único lugar conocido con vida y que no se ha encontrado evidencia confirmada de vida extraterrestre. Astrobiología NASA
[2] Kasting, J. F., Whitmire, D. P. & Reynolds, R. T. (1993; revisión posterior). Habitable Zones around Main Sequence Stars. Icarus, 101, 108–128. Para el marco más amplio de habitabilidad planetaria: The Habitability of Our Earth and Other Earths, Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Annual Reviews
[3] Magnabosco, C. et al. (2024). Toward a Natural History of Microbial Life. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 52, 85–108. El trabajo destaca que la mayor parte de la historia terrestre fue microbiana y analiza la coevolución entre microorganismos y planeta. Annual Reviews
[4] Mussini, G. (2024). Children of time: the geological recency of intelligence and its implications for SETI. International Journal of Astrobiology, 23, e27. El estudio destaca la extraordinaria recencia geológica de las condiciones evolutivas que precedieron a la inteligencia tecnológica humana. cambridge.org
[5] Marino, L. (2015). The landscape of intelligence. En S. J. Dick (ed.), The Impact of Discovering Life beyond Earth, Cambridge University Press. El capítulo aborda la evolución de la inteligencia como problema astrobiológico y cuestiona interpretaciones antropocéntricas de la inteligencia.

CAPITULO IX

El Futuro Cósmico: Información, Energía y Organización

Si la información puede conservarse, acumularse, transmitirse y utilizarse para modificar las transformaciones de un sistema, la siguiente cuestión surge de manera inevitable: ¿qué sucede cuando ampliamos la escala temporal mucho más allá de la duración de un organismo, de una civilización o incluso de una especie? La historia de la vida puede parecer extraordinariamente larga desde nuestra perspectiva, pero resulta insignificante frente a las escalas temporales en las que evolucionan las estrellas, las galaxias y las estructuras cosmológicas.

Pensar en el futuro del universo obliga, por tanto, a abandonar cualquier interpretación de la evolución como un proceso necesariamente orientado hacia el progreso. El futuro no tiene por qué significar una mejora respecto del presente. Puede significar simplemente transformación. Las estrellas nacen, evolucionan y desaparecen; las galaxias modifican sus estructuras; los objetos compactos permanecen durante periodos enormes; y las condiciones físicas que permiten determinados procesos cambian con el tiempo. La evolución cósmica no necesita conducir hacia una forma determinada de organización.

Las estrellas constituyen uno de los ejemplos más evidentes. Su energía procede de procesos de fusión nuclear y, dependiendo de su masa, atraviesan diferentes etapas antes de convertirse en remanentes como enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros. El Sol, por ejemplo, terminará su fase actual y evolucionará hacia una enana blanca que se enfriará progresivamente. [1] La materia y la energía que participan en estos procesos no desaparecen simplemente; cambian de forma y pueden volver a intervenir en nuevas estructuras.

Esta transformación introduce una cuestión importante para nuestro modelo. La energía disponible para realizar determinadas transformaciones no permanece constante a lo largo de la historia cósmica. Tampoco permanecen constantes las condiciones bajo las cuales la materia puede organizarse. El universo no es un escenario inmóvil sobre el que la vida desarrolla su historia, sino un sistema en evolución dentro del cual cambian continuamente las condiciones físicas que hacen posibles diferentes formas de organización.

La expansión acelerada del universo constituye aquí una de las cuestiones fundamentales. Las observaciones cosmológicas indican que la expansión se está acelerando, aunque la naturaleza de la energía oscura responsable de este

comportamiento continúa siendo desconocida. Existen diferentes posibilidades teóricas, desde una constante cosmológica hasta modelos que modifican nuestra descripción de la gravedad a escalas cosmológicas. [2] Por ello, cualquier descripción del futuro remoto del universo debe entenderse como una extrapolación condicionada por el modelo cosmológico que adoptemos.
Esto es especialmente importante porque nuestro planteamiento no necesita asumir un único destino cosmológico. La hipótesis que estamos construyendo puede formularse de manera más general: mientras existan regiones, estructuras y flujos energéticos capaces de sostener procesos organizados, puede existir la posibilidad de conservar y utilizar información.

La cuestión no es, por tanto, si el universo entero llegará a estar ordenado, sino si pueden existir localmente sistemas capaces de mantener y ampliar su organización mientras las condiciones físicas lo permitan. Esta distinción es fundamental.

La segunda ley de la termodinámica establece una dirección estadística para la evolución de la entropía de un sistema aislado. Pero esta afirmación no significa que toda estructura local deba desaparecer inmediatamente ni que el universo no pueda contener regiones de organización creciente. Los sistemas abiertos pueden mantener estructuras organizadas mediante intercambios de energía y materia con su entorno. La organización local no constituye una excepción a la segunda ley, sino que puede coexistir con una producción y transferencia de entropía hacia el entorno. [3]

La vida constituye precisamente uno de los ejemplos más complejos de esta situación. Un organismo mantiene estructuras altamente organizadas porque intercambia continuamente materia y energía con el exterior. Cuando esos flujos desaparecen, la capacidad del sistema para mantener su organización también termina.

Lo mismo puede decirse, en otra escala, de una civilización tecnológica. Una ciudad, una red informática o una infraestructura energética solo pueden mantener su organización mientras dispongan de materiales, energía y mecanismos capaces de reparar y coordinar sus componentes. La organización, por tanto, nunca es gratuita.

Mantener información almacenada también requiere un soporte físico. Una memoria biológica necesita estructuras moleculares; un libro necesita materia organizada; un disco necesita estados físicos diferenciables; una red informática necesita dispositivos, energía y condiciones materiales para conservar sus estados. La información puede parecer abstracta, pero su conservación nunca es completamente independiente de la materia. Esta cuestión adquiere una importancia especial cuando hablamos de procesos informacionales a gran

escala. Manipular información tiene consecuencias termodinámicas. La termodinámica de la información estudia precisamente la relación entre estados informacionales, entropía y costes energéticos, y ha mostrado que determinadas operaciones de procesamiento de información están sujetas a restricciones físicas. [4]

Por tanto, si imaginamos una civilización que intenta conservar información durante escalas temporales enormes, no bastaría con disponer de información valiosa. Tendría que conservar los soportes físicos que la contienen, disponer de energía para mantenerlos y desarrollar mecanismos para corregir los errores producidos por el paso del tiempo y por las perturbaciones del entorno. La información no sobrevive simplemente porque sea información. Sobrevive cuando existe algún proceso físico capaz de conservarla. Esto nos devuelve a una idea que apareció en capítulos anteriores: la información puede cambiar de soporte.

Una determinada configuración puede comenzar formando parte de un organismo; posteriormente puede convertirse en una conducta aprendida, en una herramienta, en un lenguaje, en un texto, en una máquina o en un sistema informático. La información puede superar la duración del soporte individual siempre que encuentre otros soportes capaces de reproducirla.

En la historia humana esta capacidad ha permitido que determinadas configuraciones informacionales sobrevivan durante periodos mucho mayores que la vida de los individuos que las generaron. La cultura y la tecnología amplían de esta manera la escala temporal de conservación.

Pero incluso esta expansión tiene límites físicos. Un archivo puede destruirse. Una biblioteca puede desaparecer. Una red puede quedar sin energía. Una infraestructura puede degradarse. Una civilización puede desaparecer y con ella gran parte de la información que había acumulado. Por ello, la acumulación informacional no constituye una garantía de permanencia.

La cuestión que nos interesa es otra: si la capacidad de conservar información aumenta, también puede aumentar la capacidad de construir sobre información previamente acumulada. Una nueva generación puede partir de soluciones anteriores; una nueva tecnología puede incorporar conocimientos precedentes; una nueva infraestructura puede utilizar otra infraestructura como soporte.

La acumulación crea así una propiedad particularmente importante: la posibilidad de construir sobre lo ya construido. Esta propiedad puede prolongarse mientras existan condiciones para conservar y transmitir información. En escalas cosmológicas, sin embargo, esas condiciones cambian. La evolución estelar muestra que las fuentes de energía disponibles no son

eternas. Las estrellas consumen su combustible y evolucionan hacia estados diferentes. Algunas dejan remanentes compactos; otras expulsan material que puede participar en generaciones posteriores de estrellas y sistemas planetarios. La historia cósmica es, por tanto, una sucesión de transformaciones energéticas y materiales en las que diferentes estructuras aparecen, interactúan y desaparecen. [1]

Durante determinados periodos pueden existir numerosas fuentes de energía concentrada. En otros, esas fuentes serán progresivamente más escasas. Si la vida y la inteligencia dependen de gradientes energéticos y de condiciones capaces de mantener sistemas alejados del equilibrio, entonces el futuro cósmico impone necesariamente una restricción sobre su posible duración. No significa que podamos calcular ahora una fecha para el final de toda organización. Significa que ningún proceso físico puede mantener indefinidamente las mismas condiciones si desaparecen los flujos energéticos que lo sostienen.

Esta cuestión introduce una paradoja interesante. La acumulación de información puede aumentar la capacidad de un sistema para organizar transformaciones, pero esa capacidad continúa dependiendo de la disponibilidad de energía y de soportes materiales. La información puede sobrevivir al individuo, pero no puede sobrevivir indefinidamente a la desaparición de todos los soportes físicos capaces de conservarla. La inteligencia puede ampliar la capacidad de utilizar energía, pero no puede crear indefinidamente nuevas fuentes energéticas a partir de la nada. La tecnología puede aumentar la capacidad de transformar el entorno, pero también puede aumentar la dependencia de estructuras cada vez más complejas. Por ello, la expansión de la organización no debe confundirse con independencia respecto de las condiciones físicas.

En realidad, ocurre lo contrario: cuanto más compleja es una organización, más relaciones puede necesitar mantener para conservar su funcionamiento. Esta dependencia introduce otra cuestión. ¿Puede una mayor cantidad de información compensar parcialmente la reducción de las posibilidades energéticas?
No sabemos que pueda hacerlo. Una civilización avanzada podría utilizar la información para mejorar extraordinariamente la eficiencia con la que aprovecha determinados gradientes energéticos. Podría desarrollar sistemas de almacenamiento, recuperación, reparación y procesamiento mucho más eficientes que los actuales. Podría encontrar nuevas fuentes de energía o explotar recursos que hoy desconocemos. Pero ninguna de estas posibilidades elimina la necesidad de que existan condiciones físicas que permitan realizar trabajo.

La inteligencia puede modificar la relación entre energía disponible y transformación conseguida, pero no elimina las restricciones termodinámicas. Esto nos permite formular una distinción importante entre cantidad de energía y capacidad de organización de la energía. Un sistema puede disponer de una

gran cantidad de energía y utilizarla de manera poco organizada. Otro puede disponer de menos energía y dirigirla hacia objetivos concretos mediante una estructura informacional más sofisticada. En ese sentido, el desarrollo de la inteligencia y de la tecnología podría interpretarse como un aumento de la capacidad de organizar transformaciones energéticas, no necesariamente como un aumento de la cantidad absoluta de energía disponible. La diferencia puede parecer pequeña, pero es fundamental para nuestra hipótesis. No estamos buscando una supuesta tendencia del universo hacia un mayor consumo energético. Estamos preguntando si existe alguna tendencia, dentro de determinadas trayectorias evolutivas, hacia una mayor capacidad para seleccionar, coordinar y controlar transformaciones mediante información.

Esta capacidad podría aumentar incluso mientras la cantidad total de energía utilizable en una determinada región disminuye. Pero aquí aparece otra limitación. Mayor capacidad de organización no significa necesariamente mayor estabilidad. Un sistema extremadamente complejo puede depender de muchas relaciones simultáneas. Una perturbación en una de ellas puede propagarse por toda la red. La complejidad puede aumentar la capacidad funcional y, al mismo tiempo, introducir nuevas formas de vulnerabilidad.

La inteligencia tampoco garantiza estabilidad. Una especie capaz de modificar su entorno puede destruir las condiciones que necesita para sobrevivir. Una civilización capaz de controlar enormes cantidades de energía puede generar riesgos que una organización menos poderosa nunca podría producir. Por tanto, la relación entre información y organización no puede formularse como una ley de progreso. La información aumenta posibilidades. La organización determina cómo se utilizan. La energía establece los límites físicos dentro de los cuales pueden realizarse.

Y la estabilidad depende de la capacidad del sistema para mantener las relaciones que sostienen su funcionamiento. Esta formulación permite regresar al problema de la entropía. Si el universo evoluciona hacia estados globalmente compatibles con una mayor entropía, ¿cómo puede haber existido y seguir existiendo organización local?

La respuesta no requiere introducir una excepción. Los sistemas locales pueden mantener o aumentar su organización mediante intercambios con el entorno, siempre que la producción total de entropía sea compatible con la segunda ley. La organización local puede crecer mientras el conjunto evoluciona termodinámicamente en otra dirección. [3]

El problema aparece cuando intentamos extender indefinidamente esta capacidad. Una estrella puede mantener durante miles de millones de años las condiciones necesarias para procesos complejos, pero finalmente cambia de

estado. Una civilización puede mantener durante miles o millones de años una infraestructura extremadamente organizada, pero necesita continuar obteniendo energía y materiales. Un sistema informático puede conservar información durante largos periodos, pero necesita soporte físico y mecanismos de corrección.

La organización siempre tiene una historia física. Esta idea adquiere una dimensión todavía mayor cuando consideramos los agujeros negros. La termodinámica de los agujeros negros ha establecido una relación profunda entre gravedad, entropía y temperatura. Los agujeros negros poseen entropía asociada a su horizonte y, según la física de Hawking, pueden emitir radiación y evolucionar termodinámicamente. Sin embargo, la interpretación completa de la información en estos procesos continúa siendo uno de los problemas abiertos más profundos de la física fundamental. [5]

Este hecho resulta especialmente significativo para nuestro planteamiento porque demuestra que la relación entre información y evolución cósmica está lejos de ser una cuestión exclusivamente biológica. La información aparece también en los problemas fundamentales de la física gravitatoria y cuántica.

Pero debemos ser cuidadosos. Que la información desempeñe un papel fundamental en la física de los agujeros negros no significa que exista una finalidad cósmica relacionada con la conservación de información. Tampoco demuestra que la evolución del universo tenga como objetivo producir sistemas informacionales cada vez más complejos. Lo que demuestra es algo más limitado: la información no puede ser tratada como una cuestión exclusivamente secundaria cuando estudiamos determinados procesos físicos fundamentales.

Esto amplía el alcance de nuestra investigación. Hasta ahora hemos seguido la información desde los procesos físicos hasta la vida, la evolución y la inteligencia. Ahora podemos invertir parcialmente la perspectiva y preguntarnos si algunos problemas de la física fundamental también obligan a considerar la información como una dimensión relevante de la descripción del universo. No significa que información, energía y materia sean equivalentes. Significa que pueden existir relaciones profundas entre ellas.

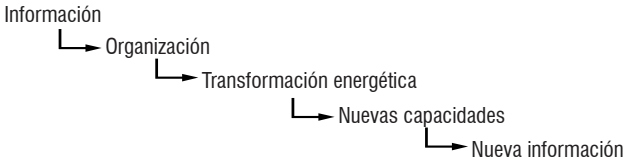
Si aceptamos provisionalmente esta posibilidad, podemos formular una hipótesis todavía más amplia. Quizá la historia cósmica pueda contemplarse como una sucesión de transformaciones en las que diferentes formas de organización aparecen, desaparecen y se recombinan. Algunas de esas formas son extremadamente simples; otras alcanzan niveles de complejidad capaces de conservar grandes cantidades de información y utilizarla para modificar su entorno. La vida sería una de esas formas. La inteligencia sería una capacidad emergente dentro de algunas de ellas. La tecnología sería una extensión externa

de esa capacidad. Pero ninguna de estas etapas tendría por qué constituir un destino. Podrían ser simplemente configuraciones temporales dentro de una historia mucho mayor. Esta interpretación cambia también nuestra forma de pensar el futuro de la inteligencia.

Si las condiciones energéticas que permiten la vida son temporales, entonces cualquier inteligencia biológica sería necesariamente una organización transitoria. Puede prolongarse mediante tecnología, trasladarse a otros entornos o crear nuevos soportes informacionales, pero siempre continuará dependiendo de las condiciones físicas que permitan mantener esos soportes. Una civilización podría sobrevivir a su planeta. Podría, hipotéticamente, sobrevivir a la transformación de su estrella. Podría utilizar diferentes fuentes de energía y construir soportes informacionales cada vez más resistentes.

Pero cada una de esas posibilidades tendría que seguir respetando las condiciones físicas del universo. La cuestión última no sería entonces cuánto puede durar una inteligencia, sino hasta qué punto puede adaptar sus soportes y sus procesos a la transformación de las condiciones que la sostienen. Esta pregunta conecta directamente con nuestra hipótesis sobre la información.

Una organización que puede conservar información puede aprender. Una organización que puede aprender puede anticipar. Una organización que puede anticipar puede modificar sus transformaciones. Una organización que puede modificar sus transformaciones puede modificar las condiciones de su propia supervivencia. Y una organización que puede modificar sus soportes puede intentar prolongar la conservación de información más allá de la duración de las estructuras originales.
Podemos reconocer aquí nuevamente la secuencia que hemos seguido:



Pero ahora aparece una escala diferente. El proceso ya no se refiere únicamente al organismo ni a la civilización. Podría referirse a la relación entre diferentes sistemas organizados a lo largo de la historia cósmica. Esta hipótesis no afirma que exista una evolución cósmica hacia una organización cada vez mayor. Afirma únicamente que, si determinados sistemas pueden conservar información y utilizarla para ampliar sus capacidades de transformación, entonces la

historia de esos sistemas puede mostrar una acumulación funcional que no puede entenderse únicamente observando cada estado por separado. Una célula contiene historia. Un organismo contiene historia. Una especie contiene historia. Una cultura contiene historia. Una tecnología contiene historia. Una civilización contiene historia. Cada una de estas escalas utiliza soportes diferentes y no puede reducirse a las demás. Pero todas muestran una propiedad común: determinados estados del pasado pueden condicionar estados posteriores.

La diferencia fundamental es que, a medida que aumenta la capacidad de conservar y procesar información, también puede aumentar la cantidad de historia que un sistema es capaz de incorporar a sus transformaciones futuras. Quizá ahí se encuentre una de las claves de nuestra hipótesis. No en una supuesta tendencia universal hacia el orden. No en una finalidad cósmica. No en una voluntad de la materia, sino en la posibilidad de que algunos sistemas, cuando disponen de determinadas condiciones, sean capaces de conservar más historia, utilizar más historia y construir sobre esa historia.

Si esto fuera cierto, la organización no tendría que aumentar necesariamente en todo el universo. Bastaría con que aparecieran, de manera localizada y temporal, sistemas capaces de acumular información y utilizarla para ampliar sus posibilidades de transformación.

La vida sería uno de esos sistemas. La inteligencia representaría una ampliación extraordinaria de esa capacidad. La tecnología permitiría trasladarla parcialmente fuera del organismo y el futuro determinaría hasta dónde puede llegar esta cadena antes de que desaparezcan las condiciones físicas que la sostienen. No sabemos si existe un límite absoluto para esa capacidad.
Tampoco sabemos si el universo terminará aproximándose a un estado de equilibrio térmico, si la energía oscura mantendrá indefinidamente el comportamiento cosmológico actualmente observado o si alguna nueva física modificará nuestras extrapolaciones. El futuro remoto depende de cuestiones que todavía no están completamente resueltas. [2]

Por ello, no podemos convertir el futuro cósmico en una conclusión cerrada. Podemos, sin embargo, formular una pregunta. Si la información permite a determinados sistemas conservar su pasado, utilizarlo para anticipar y modificar sus transformaciones, y construir nuevos soportes capaces de conservar todavía más información, ¿podría existir una historia cósmica de la organización que no sea una simple acumulación de estructuras, sino una expansión progresiva de la capacidad de la materia para conservar y utilizar su propia historia?

La pregunta sigue siendo hipotética. Pero introduce una posibilidad que hasta ahora no habíamos formulado con toda su amplitud. Quizá la vida y la

inteligencia no sean únicamente acontecimientos dentro de la historia del universo. Quizá sean también formas mediante las cuales el universo, sin intención ni finalidad, produce sistemas capaces de conservar una parte de su propia historia y utilizarla para transformar el futuro. Si esta posibilidad tuviera algún fundamento físico general, entonces nuestra especie no sería el final de la historia. Sería solamente una de sus manifestaciones. Y la pregunta siguiente sería inevitable:

¿puede hablarse realmente de una evolución cósmica de la información, o estamos proyectando sobre el universo una propiedad que solo conocemos porque nosotros mismos somos sistemas capaces de conservar, procesar y utilizar información?

Referencias del capítulo IX

[1] NASA Science. Stars. NASA. Descripción de la evolución estelar, formación de remanentes y destino del Sol como enana blanca. NASA Science
[2] Frieman, J. A., Turner, M. S. & Huterer, D. (2008). Dark Energy and the Accelerating Universe. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 46, 385–432. Revisión de la evidencia de la expansión acelerada y de las principales posibilidades teóricas sobre la energía oscura. Annual Reviews
[3] Maletin, N. (2026). Thermodynamics of the entropic balance in living systems. Discover Applied Sciences, 8, 326. Discusión de sistemas vivos como sistemas abiertos fuera del equilibrio y de la coexistencia entre organización local, disipación y producción de entropía. Springer Nature Link
[4] Parrondo, J. M. R., Horowitz, J. M. & Sagawa, T. (2015). Thermodynamics of information. Nature Physics, 11, 131–139. Revisión de las relaciones entre información, entropía y costes energéticos del procesamiento de información. Nature
[5] Mann, R. B. (2026). Black-hole thermodynamics. Nature Reviews Physics, 8, 425–436. Revisión de la termodinámica de los agujeros negros, su entropía, temperatura y de los problemas abiertos relacionados con la información.

CAPITULO X

La Gran Hipótesis: ¿una Evolución Cósmica de la Información?

Hasta este punto hemos seguido una secuencia que comenzó con la transformación de la energía y pasó por la persistencia, la conservación de información, la autorregulación, la reproducción, la evolución, el aprendizaje, la anticipación y, finalmente, la inteligencia. Hemos observado después cómo determinadas formas de inteligencia pueden extender su capacidad de organización fuera del organismo mediante herramientas, máquinas y sistemas tecnológicos. También hemos ampliado la escala temporal hasta considerar la evolución de las estrellas, la disponibilidad de energía y los límites físicos de cualquier organización. Ahora podemos formular la pregunta que se encontraba implícita desde el principio: ¿constituyen todos estos fenómenos acontecimientos independientes o existe entre ellos una continuidad funcional más profunda?

La pregunta no pretende establecer que el universo tenga una finalidad. Tampoco afirma que exista una voluntad inscrita en la materia ni que la evolución cósmica conduzca necesariamente hacia la vida, la inteligencia o la tecnología. La hipótesis que podemos explorar es mucho más limitada y, precisamente por ello, más susceptible de ser examinada: quizá determinadas condiciones físicas permitan que aparezcan sistemas capaces de conservar información, utilizarla para mantener su organización, acumularla a través del tiempo y emplearla posteriormente para modificar sus propias transformaciones. Si esta posibilidad fuese correcta, no estaríamos ante una evolución entendida como progreso hacia algo previamente establecido, sino ante una acumulación histórica de capacidades. La diferencia es fundamental. El progreso implica una dirección valorativa y supone que un estado posterior es, de alguna manera, mejor que uno anterior. La evolución, en cambio, no necesita contener ningún criterio de mejora. Puede producir adaptación, diversificación, pérdida de complejidad, especialización, extinción o transformaciones completamente contingentes. La historia de la vida no es una escalera. Nuestra hipótesis tampoco necesita una escalera. Solo necesita una posibilidad: que determinados sistemas sean capaces de conservar parte de su historia y utilizarla para modificar sus estados posteriores.

Esta propiedad apareció inicialmente de una manera elemental. Una configuración física puede persistir; una reacción puede dejar productos que condicionen reacciones posteriores; una estructura puede conservar una diferencia respecto de su estado anterior. Cuando esa persistencia adquiere capacidad funcional, la información deja de ser únicamente una diferencia conservada y comienza a

intervenir en la dinámica del sistema. La vida representa una ampliación extraordinaria de esta posibilidad. Una célula no solo conserva determinadas configuraciones: dispone de redes capaces de transformar materia y energía, mantener condiciones internas, responder a variaciones del entorno y reproducir parte de la información necesaria para construir nuevas organizaciones. La investigación contemporánea sobre el origen de la vida estudia precisamente la transición desde sistemas químicos hacia entidades portadoras de información y capaces de evolucionar, así como las restricciones físicas y la posible coevolución de energía, materia e información. [1] Los estudios sobre autoorganización fuera del equilibrio exploran asimismo cómo la compartimentación, las redes metabólicas y los mecanismos de reproducción pueden integrarse en sistemas químicos con propiedades semejantes a las de la materia viva. [2]

A partir de ahí aparece una nueva propiedad: la historia puede acumularse. Una modificación heredable puede incorporarse a generaciones posteriores; una experiencia puede modificar la conducta de un organismo; una práctica puede transmitirse socialmente; una herramienta puede conservar físicamente una solución descubierta anteriormente; un texto puede preservar una relación que de otro modo desaparecería con quien la formuló; un programa puede convertir una secuencia de operaciones en una estructura reproducible. La información deja así de limitarse a conservar el pasado. Puede convertirse en una capacidad para construir sobre el pasado. Esta es quizá la propiedad más importante que hemos encontrado a lo largo de todo el recorrido. No se trata simplemente de almacenar más información. Una acumulación cuantitativa de datos no garantiza ninguna transformación cualitativa. Lo decisivo es que la información acumulada pueda incorporarse a nuevas relaciones y utilizarse para modificar las posibilidades posteriores del sistema. Una célula puede conservar información hereditaria; un organismo puede utilizar información procedente de su experiencia; una población puede acumular modificaciones durante generaciones; una sociedad puede conservar conocimientos mediante lenguaje y cultura; una tecnología puede incorporar físicamente procedimientos desarrollados por generaciones anteriores.

En cada caso existe una diferencia de soporte, de escala y de mecanismo. No son fenómenos equivalentes. Pero todos comparten una propiedad funcional: el presente puede contener efectos del pasado capaces de modificar el futuro. La evolución de los sistemas de almacenamiento y transmisión de información constituye, de hecho, una dimensión reconocida de las grandes transiciones evolutivas, desde sistemas hereditarios anteriores o alternativos al ADN hasta formas posteriores de transmisión de información. [4]

Esta continuidad no demuestra que exista una evolución cósmica de la información. Pero sí proporciona la base conceptual para preguntarnos si podría

existir. La pregunta cambia entonces de escala. Si en determinados sistemas la información puede acumularse, ¿puede esa acumulación aumentar progresivamente la capacidad del sistema para organizar transformaciones? La respuesta parece afirmativa en algunos contextos concretos. Una herramienta puede ampliar una capacidad física. Una máquina puede automatizar una secuencia. Una infraestructura puede coordinar numerosos procesos. Un sistema informático puede procesar grandes cantidades de información y utilizar sus resultados para controlar procesos materiales. Pero debemos evitar nuevamente una conclusión excesiva. Que determinadas trayectorias permitan una creciente capacidad de organización no significa que la materia, en general, tienda hacia ella.

La física conocida no establece una ley según la cual el universo deba generar estructuras cada vez más complejas. De hecho, todavía no disponemos de un principio general que explique de manera completa la autoorganización espontánea en sistemas físicos fuera del equilibrio. Una revisión publicada en Physics Reports en 2024 señala precisamente que, pese a más de un siglo de investigación, la física todavía carece de principios básicos generalmente aceptados que expliquen de manera completa la autoorganización espontánea. El campo estudia actualmente cómo formular matemáticamente la organización emergente y cómo relacionarla con la dinámica física subyacente. [5] Por tanto, debemos distinguir cuidadosamente entre dos afirmaciones. La primera es relativamente modesta: determinadas condiciones físicas pueden permitir la aparición de estructuras organizadas capaces de mantenerse y transformarse. La segunda es mucho más fuerte: el universo posee una tendencia general hacia una creciente organización mediante información. La primera encuentra numerosos ejemplos en la física, la química y la biología. La segunda todavía no está demostrada.

Nuestro trabajo se sitúa precisamente en el espacio que existe entre ambas. La hipótesis consiste en preguntar si los fenómenos que conocemos como autoorganización, vida, evolución, aprendizaje, inteligencia y tecnología pueden contemplarse como manifestaciones sucesivas de una misma propiedad más general: la capacidad de determinados sistemas para conservar diferencias, incorporarlas a su estructura histórica y utilizarlas para ampliar las posibilidades de transformación. Esta formulación tiene una ventaja importante. No necesita atribuir intención al universo. Un sistema puede producir una estructura más compleja sin que exista ningún objetivo hacia el cual se dirija. Una reacción química no necesita saber qué resultado producirá para participar en una organización. Una célula no necesita comprender su propia existencia para regularse. Un organismo no necesita representar conscientemente la evolución para transmitir una modificación. Una población no necesita perseguir la adaptación para que la selección natural modifique su composición.

La organización puede emerger sin propósito. La información puede conservarse sin intención. La acumulación puede producirse sin planificación. Y la inteligencia puede aparecer, precisamente, como una capacidad posterior de algunos sistemas para introducir planificación donde anteriormente solo existían procesos no conscientes.

Esta distinción permite formular de otra manera la cuestión central del libro. Quizá el universo no tienda hacia la inteligencia. Quizá, bajo determinadas condiciones, la inteligencia sea una de las posibilidades que aparecen cuando ciertos sistemas alcanzan suficiente capacidad para conservar, combinar y utilizar información. Y quizá la tecnología represente una nueva transición en la que parte de esas capacidades deja de depender exclusivamente de la organización biológica. Esta última posibilidad resulta especialmente significativa. Durante miles de millones de años, toda la información capaz de intervenir activamente sobre transformaciones complejas parecía estar vinculada a sistemas vivos. La información genética estaba integrada en organismos; la percepción y el aprendizaje dependían de estructuras biológicas; el comportamiento adaptativo se desarrollaba dentro de sistemas vivos. Con la aparición de la cultura, parte de esa información comenzó a externalizarse. Con la escritura, una parte de la memoria dejó de depender exclusivamente del cerebro. Con las herramientas, determinadas soluciones quedaron incorporadas a objetos. Con las máquinas, determinadas secuencias de transformación quedaron incorporadas a mecanismos. Con los ordenadores, una parte creciente del procesamiento de información pasó a realizarse en soportes artificiales.

Esto no demuestra que la tecnología sea una nueva forma de vida ni que las máquinas posean conciencia. Tampoco demuestra que exista una evolución independiente de los sistemas artificiales. Pero sí muestra que la capacidad de conservar y procesar información puede extenderse más allá de las estructuras biológicas que originalmente la desarrollaron. La consecuencia conceptual es importante. Si la información puede cambiar de soporte, entonces su historia no tiene por qué quedar limitada a un único tipo de organización material. Una configuración informacional puede pasar de una generación a otra mediante la herencia. Puede pasar de un individuo a otro mediante el aprendizaje. Puede pasar de una persona a una comunidad mediante la transmisión social. Puede pasar de una comunidad a un objeto mediante una herramienta. Puede pasar de una herramienta a una máquina. Puede pasar de una máquina a un sistema informático. No existe aquí una sustitución completa de un soporte por otro. Cada transición añade posibilidades y también introduce nuevas limitaciones. La información genética depende de organismos capaces de reproducirla; la información cultural depende de organismos capaces de transmitirla; la información escrita depende de soportes materiales; la información digital depende de sistemas físicos capaces de almacenarla, procesarla y mantenerla. La información nunca queda liberada de la materia. Lo que puede cambiar es la forma en que la materia consigue conservarla y utilizarla.

Esta observación nos permite regresar a la relación entre información y energía. La información no es energía. Una descripción informacional no puede realizar por sí misma un trabajo físico. Para transformar el mundo se necesitan procesos materiales y energéticos. Sin embargo, la información puede intervenir en la selección, coordinación y regulación de esos procesos. La termodinámica de la información ha mostrado que el procesamiento informacional está sometido a restricciones físicas y que las operaciones sobre información tienen relaciones cuantificables con entropía y energía. [3] Por tanto, quizá la relación que buscamos no sea:

Información → Energía

sino:

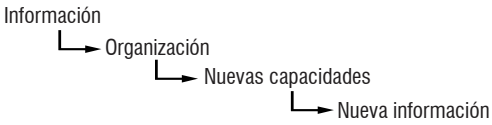
Información → Organización de transformaciones → Utilización de energética

Esta diferencia permite formular nuestra hipótesis de una manera mucho más precisa. No estamos proponiendo que la información constituya una fuente de energía. Estamos preguntando si la acumulación de información puede aumentar, en determinados sistemas, la capacidad para dirigir la energía disponible hacia transformaciones funcionalmente seleccionadas. Una célula utiliza información molecular para regular procesos. Un organismo utiliza información sensorial para orientar su conducta. Un animal utiliza memoria y aprendizaje para seleccionar acciones. Una sociedad utiliza información acumulada para coordinar millones de acciones. Una tecnología utiliza información incorporada en sus estructuras para ejecutar transformaciones. La capacidad cambia de escala, pero la relación funcional permanece reconocible. Información y organización aparecen relacionadas, y la organización determina, dentro de los límites físicos disponibles, qué transformaciones pueden realizarse.

Esta posibilidad permite reinterpretar la evolución de la vida sin convertirla en una historia de progreso. La evolución no habría tenido que estar dirigida hacia la inteligencia. Bastaría con que, en determinadas circunstancias, los sistemas capaces de conservar información y reproducirse generasen variaciones sobre las que actuaran las condiciones ambientales. Algunas configuraciones desaparecerían; otras persistirían; algunas permitirían una mejor explotación de los recursos disponibles; otras resultarían ineficaces. Y, a lo largo de enormes escalas temporales, ciertas líneas evolutivas podrían acumular mecanismos cada vez más sofisticados para percibir, regular, aprender y anticipar. La inteligencia aparecería entonces no como destino, sino como una posibilidad emergente dentro de determinadas trayectorias históricas.

Esta interpretación también modifica nuestra manera de contemplar la inteligencia humana. El ser humano no tendría por qué representar la culmina-

ción de este proceso. Podría representar simplemente una etapa concreta en la que la información acumulada ha alcanzado una capacidad extraordinaria para reorganizar el entorno. Nuestra especie no solo utiliza información para sobrevivir. Utiliza información para construir nuevos soportes capaces de conservar todavía más información. Esta propiedad genera un fenómeno de retroalimentación:



La nueva capacidad permite obtener más información. La nueva información permite construir nuevas capacidades. Las nuevas capacidades modifican el entorno. El entorno modificado genera nuevas condiciones. Y esas condiciones producen nuevas informaciones que pueden volver a incorporarse al sistema. Si esta dinámica se mantiene durante suficiente tiempo, puede producir una acumulación histórica extraordinaria sin que exista ningún objetivo previamente establecido.

La evolución cultural y tecnológica constituye un ejemplo terrestre de esta posibilidad. Pero precisamente aquí debemos introducir una pregunta crítica: ¿es esta dinámica exclusivamente terrestre? No lo sabemos. Podría ser una particularidad extraordinariamente improbable de la evolución de nuestro planeta. Podría repetirse allí donde aparezcan sistemas vivos capaces de conservar y procesar información. Podría incluso existir una continuidad más profunda entre procesos físicos, químicos y biológicos que todavía no sabemos describir matemáticamente. Las tres posibilidades siguen abiertas. La hipótesis cosmológica solo adquiere verdadero interés si podemos encontrar alguna propiedad que conecte estos niveles sin necesidad de introducir una finalidad externa.

Y aquí aparece uno de los puntos más delicados de nuestra propuesta. No podemos utilizar la existencia de vida e inteligencia para demostrar que el universo tiende hacia ellas. Eso sería razonar desde el resultado hacia una supuesta causa. El hecho de que nosotros existamos demuestra que las condiciones que nos permitieron existir fueron posibles. No demuestra que fueran inevitables. Tampoco demuestra que fueran probables. Y mucho menos demuestra que el universo estuviera orientado hacia ellas. La existencia de una trayectoria no demuestra que exista una dirección universal.

Por eso debemos formular nuestra hipótesis en términos de posibilidad física y repetibilidad, no de finalidad. Si determinadas condiciones permiten que aparezcan sistemas capaces de conservar información y aumentar su

capacidad de organización, entonces podemos preguntar si esas condiciones son suficientemente generales como para haber producido procesos semejantes en otros lugares y momentos. Esta es una pregunta científica. La finalidad, en cambio, pertenece a otro nivel. Podemos observar que la información se conserva. Podemos estudiar cómo se transmite. Podemos analizar cómo participa en la regulación. Podemos observar cómo la vida acumula modificaciones. Podemos estudiar cómo la inteligencia utiliza información para anticipar. Podemos observar cómo la tecnología externaliza determinadas capacidades. Pero no podemos deducir de estos hechos que el universo quiera conservar información.

No existe ninguna necesidad de introducir una voluntad cósmica para explicar la aparición de sistemas que conservan información. La organización puede ser emergente. La complejidad puede ser contingente. La vida puede ser improbable. La inteligencia puede ser excepcional. Y, aun así, todas ellas pueden pertenecer a una misma historia física.

Aquí es donde nuestra hipótesis alcanza su formulación más precisa: Quizá la evolución cósmica no consista en una tendencia universal hacia el orden, sino en la aparición localizada y temporal de sistemas capaces de conservar cada vez más información sobre sus estados anteriores y utilizar esa información para ampliar sus posibilidades de transformación.

Esta formulación es deliberadamente más débil que afirmar que el universo evoluciona hacia la inteligencia. Y precisamente por eso resulta más interesante. Porque puede ser examinada. Si fuera correcta, deberíamos encontrar alguna relación general entre disponibilidad de energía, sistemas fuera del equilibrio, conservación de información y aparición de organización. Deberíamos poder determinar bajo qué condiciones la información acumulada aumenta realmente la capacidad de un sistema para modificar sus estados futuros.

También deberíamos poder identificar sus límites. Porque una hipótesis científica no se fortalece solamente buscando ejemplos que parezcan confirmarla. Debe poder enfrentarse a aquellos casos en los que no funciona. Si existen sistemas capaces de conservar enormes cantidades de información sin aumentar su capacidad organizativa, entonces la acumulación informacional por sí sola no será suficiente. Si existen sistemas altamente organizados sin mecanismos relevantes de conservación histórica, tendremos que revisar nuestra interpretación. Si la evolución muestra repetidamente trayectorias en las que la información acumulada no genera ninguna expansión funcional, deberemos limitar la hipótesis. Y si finalmente se demuestra que no existe ninguna relación general entre información, organización y capacidad de transformación, nuestra construcción tendrá que ser abandonada o reformulada.

Esto no constituye una debilidad. Es precisamente lo que permite que una hipótesis deje de ser una intuición filosófica y pueda comenzar a convertirse en una cuestión investigable. Hasta ahora hemos recorrido una cadena que puede expresarse así:



Ahora podemos añadir una pregunta diferente: ¿existe una continuidad física que permita comprender esta cadena como una trayectoria particular dentro de la evolución del universo?

No sabemos todavía cuál sería la respuesta. Pero sí podemos establecer lo que la hipótesis no afirma. No afirma que el universo tenga una finalidad. No afirma que la vida sea inevitable. No afirma que la inteligencia sea el destino de la materia. No afirma que la complejidad aumente indefinidamente. No afirma que la información sea una sustancia. No afirma que información y energía sean equivalentes. No afirma que la humanidad constituya el punto culminante de la evolución. Afirma algo mucho más concreto: que determinados sistemas físicos pueden conservar información, utilizarla para mantener y modificar su organización, acumularla históricamente y ampliar mediante ella su capacidad de transformación.

La gran cuestión consiste ahora en determinar si esta propiedad debe considerarse únicamente una característica particular de la vida terrestre o si puede formar parte de una dinámica más general de la materia organizada. Si fuera exclusivamente terrestre, nuestra hipótesis quedaría limitada a la historia de nuestro planeta. Si fuera reproducible bajo determinadas condiciones, la vida podría representar una posibilidad cósmica recurrente. Si además existiera una relación general entre acumulación informacional y capacidad de organización, entonces la aparición de sistemas cada vez más capaces de conservar y utilizar información podría constituir una posibilidad más amplia de la evolución cósmica.

Todavía no sabemos cuál de estas alternativas es correcta. Pero podemos formular la pregunta de una manera que ya no dependa exclusivamente de nuestra propia existencia: ¿puede la materia, cuando dispone de energía, estabilidad suficiente y mecanismos para conservar información, generar sistemas capaces de utilizar esa información para ampliar progresivamente sus posibilidades de organización?

Si la respuesta fuera afirmativa, no significaría que el universo tenga un propósito. Significaría algo más extraño y, quizá, más profundo: que la capacidad de conservar historia podría ser una de las condiciones que permiten a determinados sistemas construir sobre ella.
Y si la historia puede conservarse, acumularse y utilizarse para modificar el futuro, entonces quizá la evolución no sea solamente una sucesión de estados. Podría ser también una acumulación de posibilidades.

Esta es la gran hipótesis que debemos llevar al último capítulo. Porque todavía queda una pregunta que ninguna acumulación de información puede responder por sí misma:
¿Por qué existe un universo capaz de generar sistemas que pueden hacerse esta pregunta?

Referencias al capítulo X

[1] Solé, R. & Kempes, C. (2025). Origins of life: the possible and the actual. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 380(1936), 20240281. DOI: 10.1098/rstb.2024.0281.
[2] Singh, A., Parvin, P., Saha, B. et al. (2024). Non-equilibrium self-assembly for living matter-like properties. Nature Reviews Chemistry, 8, 723–740. DOI: 10.1038/s41570-024-00640-z.
[3] Parrondo, J. M. R., Horowitz, J. M. & Sagawa, T. (2015). Thermodynamics of information. Nature Physics, 11, 131–139. DOI: 10.1038/nphys3230.
[4] Jablonka, E. & Szathmáry, E. (1995). The evolution of information storage and heredity. Trends in Ecology & Evolution, 10(5), 206–211. DOI: 10.1016/S0169-5347(00)89060-6.
[5] S. et al. (2024). On principles of emergent organization. Physics Reports, 1071, 1–47. DOI: 10.1016/j.physrep.2024.04.001.

CAPITULO IX

La Última Pregunta

Llegados a este punto, quizá la cuestión más importante no sea añadir una nueva etapa a la secuencia que hemos construido, sino detenernos y preguntar hasta dónde podemos avanzar sin convertir una hipótesis en una certeza. A lo largo de los capítulos anteriores hemos recorrido una posible continuidad conceptual que comienza con la transformación de la energía y pasa por la persistencia, la conservación de información, la organización, la vida, la acumulación histórica, la anticipación y, finalmente, la inteligencia. Sin embargo, que podamos establecer relaciones funcionales entre estos fenómenos no significa que exista una ley universal que obligue al universo a recorrerlos. La ciencia puede describir mecanismos y establecer relaciones observables; puede formular hipótesis sobre procesos todavía incompletamente conocidos; pero no debería convertir una sucesión interpretativa en una necesidad cósmica. Precisamente por eso, este último capítulo no pretende cerrar el problema, sino delimitar aquello que podemos afirmar, aquello que podemos interpretar y aquello que todavía debemos considerar una hipótesis.

El origen de la vida constituye uno de los principales límites de nuestro conocimiento. Conocemos numerosos mecanismos físicos y químicos capaces de generar organización, autoensamblaje, compartimentación, redes de reacción y sistemas que pueden conservar determinadas configuraciones, pero todavía no disponemos de una reconstrucción experimental completa y universalmente aceptada que muestre cómo se produjo el tránsito desde la química prebiótica hasta las primeras entidades vivas capaces de evolucionar. La investigación contemporánea considera cada vez más relevante la interacción entre materia, energía e información en ese tránsito, y estudia cómo pudieron aparecer sistemas capaces de conservar información, reproducirse y evolucionar bajo determinadas condiciones físicas. [1] Esto no demuestra que exista una trayectoria necesaria desde la materia inerte hasta la vida, pero sí permite formular una pregunta más precisa: ¿qué propiedades físicas hacen posible que determinados sistemas pasen de reaccionar ante su entorno a conservar, utilizar y transmitir las consecuencias de esas interacciones?

Algo parecido ocurre con la autoorganización. Sabemos que determinados sistemas alejados del equilibrio pueden generar estructuras organizadas y mantenerlas mientras dispongan de los flujos de materia y energía necesarios. Los sistemas biológicos constituyen ejemplos especialmente complejos de esta capacidad, pero el fenómeno de la autoorganización no implica por sí mismo

una tendencia universal hacia una mayor organización. La aparición de estructuras locales puede coexistir perfectamente con un aumento global de la entropía. [2] Por tanto, hablar de «orden sobre el caos» no debe interpretarse como si el universo tuviera una finalidad orientada hacia el orden. El término orden describe aquí una capacidad de determinados sistemas para establecer relaciones estables entre sus componentes y regular determinados procesos, no una dirección cósmica predeterminada.

Esta distinción resulta todavía más importante cuando introducimos la evolución. La evolución biológica no constituye una escalera universal en la que cada etapa deba ser necesariamente más compleja que la anterior. No existe una ley conocida que obligue a las poblaciones a incrementar indefinidamente su complejidad, y la historia evolutiva está determinada por la interacción entre variación, herencia, selección, deriva, restricciones físicas, contingencias históricas y condiciones ambientales. De hecho, la teoría evolutiva no proporciona una razón general para esperar que las líneas evolutivas aumenten necesariamente su complejidad con el tiempo. [3] La secuencia propuesta en este libro debe entenderse, por tanto, como una reconstrucción funcional de determinadas posibilidades que han aparecido en la historia de la vida, no como una ley universal del desarrollo de la materia.

También debemos precisar qué entendemos por información. La información no es una sustancia que pueda acumularse independientemente de cualquier soporte físico. Toda información necesita una realización material capaz de conservar diferencias, relaciones o estados distinguibles. Su almacenamiento, transmisión y procesamiento están sujetos a restricciones físicas y termodinámicas. La termodinámica de la información ha mostrado que las operaciones informacionales no pueden separarse completamente de los procesos físicos que las realizan, aunque tampoco sea correcto identificar información y energía como si fueran magnitudes equivalentes. [4] Esta distinción es fundamental para la hipótesis desarrollada en este libro: cuando hablamos de una posible evolución de la información no estamos proponiendo que la información constituya una sustancia cósmica que evoluciona por sí misma, sino que determinados sistemas físicos pueden adquirir, mediante su propia historia, nuevas capacidades para conservar, transmitir, combinar y utilizar información.

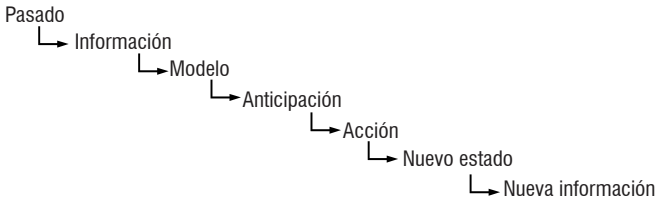
Desde esta perspectiva, la relación que hemos venido construyendo puede expresarse de una manera sencilla: la energía hace posibles las transformaciones; la información conserva diferencias y relaciones; la organización coordina las transformaciones; la vida integra estos procesos en sistemas capaces de mantenerse; y la inteligencia amplía la capacidad de utilizar información para seleccionar entre distintas posibilidades. Esta formulación no pretende establecer una ley universal, sino proporcionar una herramienta conceptual para analizar cómo pueden relacionarse fenómenos que normalmente estudiamos

por separado. La energía no necesita información para existir, la información no constituye una forma especial de energía y la organización no implica necesariamente vida. Sin embargo, cuando determinadas condiciones físicas permiten que estos elementos se integren en sistemas capaces de conservar su historia y utilizarla para modificar sus estados posteriores, aparece una dinámica cualitativamente diferente.

La vida representa precisamente uno de los ejemplos más extraordinarios de esa integración. Una célula transforma materia y energía, conserva información hereditaria, regula intercambios, repara estructuras, responde a cambios ambientales y produce nuevas unidades capaces de continuar la historia de su linaje. No se trata de un sistema estático, sino de una organización dinámica cuya permanencia depende precisamente de que pueda mantener determinadas relaciones mientras intercambia continuamente materia y energía con su entorno. La vida no elimina la transformación: la utiliza para conservar una determinada organización. A partir de ahí, la evolución permite que algunas de las soluciones desarrolladas por una generación puedan convertirse en condiciones de partida para las siguientes. La historia comienza entonces a adquirir una importancia creciente, porque cada nueva generación no parte exactamente de cero.

Pero esta capacidad acumulativa tampoco implica necesariamente una mejora. La complejidad puede aumentar las posibilidades de un sistema y, al mismo tiempo, introducir nuevas dependencias y vulnerabilidades. Una estructura más compleja puede disponer de más mecanismos de regulación, pero también necesitar más recursos para mantenerlos. Una inteligencia más desarrollada puede ampliar enormemente la capacidad de intervención sobre el entorno, pero no garantiza que las decisiones adoptadas sean beneficiosas para el propio sistema. Del mismo modo, una mayor cantidad de información no implica automáticamente una mayor capacidad para utilizarla. La acumulación solo adquiere valor funcional cuando existe alguna capacidad para conservar, seleccionar, relacionar o utilizar aquello que se ha acumulado.

En este punto aparece una de las características más singulares de nuestra especie: la capacidad para externalizar información. Una solución que originalmente existe en la estructura de un organismo puede pasar a expresarse mediante una conducta; una conducta puede convertirse en una herramienta; una herramienta puede integrarse en una tecnología; una experiencia puede transformarse en lenguaje; el lenguaje puede convertirse en escritura; la escritura puede almacenarse en soportes físicos; y esos soportes pueden ser procesados posteriormente por máquinas. La información puede cambiar así de soporte sin convertirse nunca en algo físicamente independiente de él. La historia que antes estaba limitada a la transmisión biológica puede comenzar a conservarse fuera del organismo. El ciclo adquiere entonces una nueva dimensión:



Este proceso abre una cuestión que todavía no podemos resolver: ¿hasta qué punto la inteligencia humana constituye una singularidad o simplemente una de las posibles configuraciones que puede alcanzar un sistema capaz de acumular y utilizar información? El hecho de que hasta ahora solo conozcamos vida en la Tierra no permite determinar si nuestra aparición constituye un acontecimiento excepcional o una posibilidad que puede repetirse bajo condiciones adecuadas. Tampoco sabemos si la inteligencia tecnológica representa una culminación, una transición o simplemente una fase temporal de la evolución terrestre. Incluso la aparición de sistemas artificiales capaces de procesar enormes cantidades de información no demuestra que posean conciencia ni que constituyan una continuación necesaria de la inteligencia biológica. Lo único que demuestra es que determinadas funciones de procesamiento pueden ser externalizadas y realizadas mediante soportes no biológicos.

La cuestión se vuelve todavía más profunda cuando consideramos el universo en su conjunto. Si la información necesita soporte físico, entonces su conservación indefinida tampoco puede darse gratuitamente. Todo soporte puede transformarse, deteriorarse o desaparecer; todo proceso de mantenimiento requiere intercambios de energía y materia; y todo sistema físico está sometido a las condiciones impuestas por la termodinámica. La conservación de información no significa, por tanto, conservación absoluta e ilimitada de todos los estados del pasado. Significa que determinados sistemas pueden mantener durante cierto tiempo diferencias físicamente relevantes y utilizarlas posteriormente para modificar su comportamiento. La irreversibilidad y la entropía introducen así un límite fundamental a nuestra capacidad de reconstruir o conservar estados anteriores, y nos recuerdan que toda inferencia sobre el pasado depende de los estados físicos disponibles en el presente. [5]

Llegados aquí, la expresión «evolución cósmica de la información» debe entenderse con extrema prudencia. No significa que el universo tenga una intención, un objetivo o un destino. Tampoco significa que la materia tienda necesariamente hacia una complejidad creciente. La hipótesis es mucho más limitada: determinados sistemas físicos pueden adquirir la capacidad de conservar información sobre sus estados anteriores y utilizar esa información para modificar sus estados posteriores. Algunos de esos sistemas pueden reproducirse; algunos pueden evolucionar; algunos pueden aprender; algunos pueden anticipar; algunos pueden construir modelos de su entorno; algunos

pueden utilizar esos modelos para seleccionar acciones; y algunos pueden externalizar parte de sus capacidades en estructuras tecnológicas capaces de conservar y procesar información fuera del organismo que las originó. Nada de esto demuestra que exista una dirección universal, pero sí permite investigar si existe una continuidad funcional entre estas capacidades.

La hipótesis más amplia que se desprende de este recorrido podría formularse, por tanto, de la siguiente manera: quizá la evolución cósmica no consista en una tendencia universal hacia el orden, sino en la aparición localizada y temporal de sistemas capaces de conservar cada vez más información sobre sus estados anteriores y utilizar esa información para ampliar sus posibilidades de transformación. La diferencia es fundamental. En la primera formulación atribuimos al universo una dirección general; en la segunda describimos una posibilidad que puede aparecer bajo determinadas condiciones y que depende de la existencia de sistemas capaces de conservar y utilizar información. No necesitamos introducir una finalidad cósmica para explicar que determinados sistemas desarrollen mayores capacidades de organización. Basta con estudiar las condiciones físicas que permiten que esas capacidades aparezcan y se mantengan.

Esta hipótesis, además, debe poder enfrentarse a la posibilidad de ser incorrecta. Si se demostrara que no existe una relación general entre la conservación de información, la capacidad de organización y la modificación de las transformaciones físicas, la hipótesis tendría que ser revisada o abandonada. Si se observaran sistemas con enormes cantidades de información almacenada pero sin ninguna capacidad adicional de organización o regulación, ello obligaría a distinguir con mayor precisión entre acumulación y utilización. Si encontráramos sistemas altamente organizados cuya organización no dependiera de una conservación histórica relevante, también tendríamos que limitar la importancia atribuida a la información acumulada. Una hipótesis científica solo conserva su valor cuando admite la posibilidad de ser corregida por aquello que todavía no conocemos.

Quizá el aspecto más interesante de todo este recorrido sea que la información parece adquirir funciones diferentes a medida que aparecen nuevos niveles de organización. Primero puede existir simplemente como una diferencia físicamente conservada; después puede participar en la regulación de un sistema; posteriormente puede ser transmitida mediante la reproducción; puede acumularse a través de generaciones; puede modificar respuestas futuras; puede incorporarse al aprendizaje; puede utilizarse para construir modelos; y finalmente puede exteriorizarse mediante herramientas y sistemas tecnológicos. Esta secuencia no implica que cada etapa sustituya a la anterior. Al contrario, cada nueva capacidad se apoya en las anteriores y las reorganiza. La información deja entonces de ser únicamente algo que permanece y comienza a convertirse en algo que permite transformar.

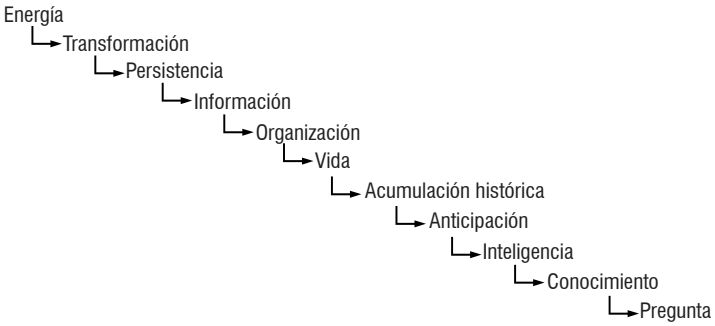
Tal vez aquí encontremos el sentido más profundo de la relación entre información y energía que ha recorrido este libro. La información no produce energía, ni la energía se convierte simplemente en información. La relación es funcional: la energía permite que ocurran transformaciones; la información permite conservar diferencias relevantes entre estados; la organización permite coordinar esas transformaciones; y determinados sistemas pueden utilizar la información conservada para decidir cómo emplear las posibilidades energéticas de las que disponen. Desde esta perspectiva, la historia de la vida puede contemplarse como una historia de sistemas capaces de conservar y utilizar cada vez más aspectos de su propia trayectoria, aunque siempre dentro de límites físicos y sin que ello implique una dirección universal.

El ser humano introduce, además, una característica aparentemente nueva: un sistema físico capaz de construir representaciones del universo del que forma parte y preguntarse por las condiciones que hicieron posible su propia existencia. Esto no significa que el universo haya adquirido conciencia de sí mismo en sentido metafísico. Significa algo más concreto y verificable: una parte de la materia organizada del universo ha desarrollado sistemas nerviosos capaces de construir modelos de su entorno, almacenar información, transmitirla entre individuos y generaciones y utilizarla para formular preguntas sobre el conjunto del que forman parte. Nuestra capacidad para formular esta pregunta no constituye una prueba de que el universo tenga un propósito. Pero sí constituye un hecho extraordinario dentro de la historia conocida de la materia.

Podemos regresar ahora al punto de partida. Si la energía permite transformaciones y esas transformaciones producen diferencias; si algunas diferencias pueden persistir; si algunas persistencias pueden conservar información; si esa información puede intervenir en la regulación; si determinados sistemas pueden reproducirse y transmitir parte de su organización; si la evolución permite acumular modificaciones; si algunas formas de vida pueden aprender y anticipar; si algunas pueden desarrollar inteligencia; y si algunas inteligencias pueden externalizar información y construir nuevos sistemas capaces de procesarla, entonces quizá la historia que hemos descrito no sea una cadena de acontecimientos independientes, sino una sucesión de posibilidades físicas que se abren unas sobre otras bajo determinadas condiciones. Pero que una posibilidad pueda abrir la siguiente no significa que tenga que hacerlo. La historia evolutiva sigue dependiendo del azar, de las restricciones, de las condiciones ambientales y de innumerables contingencias.
Por eso, la pregunta final de este libro no puede ser si el universo «quiere» producir vida, inteligencia u organización. Esa pregunta introduce una finalidad que no necesitamos y que no podemos demostrar. La cuestión científicamente más interesante es otra: ¿existe alguna propiedad física general que permita que la materia, bajo determinadas condiciones, conserve su historia, utilice esa historia para modificar sus transformaciones y, mediante esa acumulación, genere sistemas capaces de ampliar progresivamente sus posibilidades de

organización? Si la respuesta fuera negativa, la vida y la inteligencia podrían constituir acontecimientos extraordinariamente particulares, resultado de una combinación excepcional de circunstancias. Si la respuesta fuera afirmativa, entonces la vida terrestre podría ser una manifestación localizada de una posibilidad más general de la materia, aunque todavía no sepamos cuántas veces puede producirse ni hasta dónde puede llegar. La diferencia entre ambas posibilidades es enorme. En el primer caso, nosotros seríamos una excepción. En el segundo, podríamos ser una fase. Pero incluso la palabra «fase» debe utilizarse con cuidado, porque no implica que exista una fase posterior predeterminada. Una fase es simplemente un estado dentro de un proceso, no una promesa de futuro. La vida podría desaparecer sin dejar continuidad alguna; la inteligencia podría ser transitoria; la tecnología podría colapsar; la información acumulada podría perderse. Nada garantiza que la historia de la organización tenga que continuar indefinidamente. El universo no tiene obligación alguna de preservar aquello que nosotros consideramos valioso.

Y, sin embargo, existe algo que sí podemos afirmar. En algún lugar del universo conocido, la materia y la energía han dado lugar a sistemas capaces de conservar información, reproducirse, evolucionar, aprender, anticipar, construir modelos, transformar su entorno y preguntarse por el origen de todo ello. No sabemos si esta capacidad es excepcional o recurrente. No sabemos si constituye una fase temprana o tardía de algún proceso mucho mayor. No sabemos si la información desempeña en la evolución cósmica un papel fundamental o si simplemente hemos encontrado en ella una propiedad especialmente importante porque nosotros mismos somos sistemas informacionales. Pero sí sabemos que la pregunta existe porque nosotros existimos, y que nuestra existencia convierte esa pregunta en un problema físico y filosófico legítimo. El recorrido completo puede expresarse finalmente de una manera sencilla:



No es una ley de la naturaleza ni una secuencia inevitable. Es una propuesta de lectura. Una forma de observar cómo, a partir de procesos físicos elementales,

pueden aparecer sistemas capaces de conservar parte de su historia y utilizarla para modificar su futuro. Y quizá la última frontera de esta investigación no consista en descubrir que el universo tiene una finalidad, sino en comprender por qué existen condiciones capaces de producir sistemas que pueden formular preguntas sobre esa misma existencia. Tal vez nunca encontremos una respuesta definitiva. Tal vez descubramos que la vida es un acontecimiento único o, por el contrario, que constituye una posibilidad recurrente en determinadas condiciones cósmicas. Tal vez la inteligencia sea una propiedad transitoria de la materia organizada o el comienzo de una nueva forma de conservación y procesamiento de información. Tal vez la tecnología represente una simple extensión de la evolución biológica o el inicio de una transformación cuya naturaleza todavía no podemos comprender. Todas estas posibilidades permanecen abiertas.

Lo que sí parece razonable es mantener abierta la investigación sin convertir la hipótesis en dogma. El universo no necesita tener un propósito para producir organización. La vida no necesita ser inevitable para ser explicable. La inteligencia no necesita ser el destino de la evolución para ser una consecuencia posible de determinadas condiciones. Y la información no necesita ser una sustancia cósmica para constituir uno de los elementos fundamentales que permiten que algunos sistemas conserven su historia y utilicen esa historia para transformar el presente. Quizá esa sea, finalmente, la única conclusión que podemos sostener sin exceder los límites de nuestro conocimiento: la materia no solamente cambia; bajo determinadas condiciones, algunos sistemas pueden conservar las consecuencias de sus cambios. Cuando esa conservación se integra con la autorregulación, la reproducción, la evolución, el aprendizaje y la anticipación, la historia comienza a adquirir capacidad causal sobre el futuro. Y cuando esa historia puede ser utilizada para construir modelos y seleccionar posibilidades, aparece aquello que denominamos inteligencia. No sabemos si esta trayectoria es excepcional, recurrente o parte de un proceso cósmico más amplio. Pero sabemos que ha ocurrido al menos una vez.
El proceso continúa.

Referencias al Capítulo XI

[1] Solé, R. & Kempes, C. (2025). Origins of life: the possible and the actual. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 380(1936), 20240281. DOI: 10.1098/rstb.2024.0281.
[2] Singh, A., Parvin, P., Saha, B. et al. (2024). Non-equilibrium self-assembly for living matter-like properties. Nature Reviews Chemistry, 8, 723–740. DOI: 10.1038/s41570-024-00640-z.
[3] Szathmáry, E. & Maynard Smith, J. (1995). The major evolutionary transitions. Nature, 374, 227–232. DOI: 10.1038/374227a0.
[4] Parrondo, J. M. R., Horowitz, J. M. & Sagawa, T. (2015). Thermodynamics of information. Nature Physics, 11, 131–139. DOI: 10.1038/nphys3230.
[5] Pachter, J. A., Yang, Y.-J. & Dill, K. A. (2024). Entropy, irreversibility and inference at the foundations of statistical physics. Nature Reviews Physics, 6, 382–393. DOI: 10.1038/s42254-024-00720-5.

CONCLUSIÓN

El Proceso Continúa

Este libro comenzó con una pregunta aparentemente sencilla: ¿puede existir alguna relación profunda entre energía, información, organización y evolución? Para intentar responderla hemos tenido que retroceder mucho más allá de la aparición de la vida y de la inteligencia, hasta los procesos físicos que hacen posibles las transformaciones de la materia. El recorrido nos ha obligado también a distinguir conceptos que con frecuencia aparecen unidos de manera imprecisa. Energía, información, orden, vida, inteligencia y conocimiento no son equivalentes ni constituyen diferentes nombres para una misma realidad. Son dimensiones distintas que, bajo determinadas condiciones, pueden llegar a integrarse en sistemas cada vez más capaces de conservar relaciones, regular sus propios procesos, acumular historia y utilizar esa historia para modificar sus estados posteriores.

La termodinámica nos ha mostrado que la transformación es inevitable y que la entropía establece una dirección estadística para los procesos físicos. Pero también hemos visto que el aumento global de la entropía no impide la aparición de estructuras organizadas en sistemas abiertos alejados del equilibrio. La organización local no constituye una excepción a la segunda ley, sino una posibilidad compatible con ella cuando existen los flujos de energía y materia necesarios. Esto nos obliga a abandonar una identificación demasiado simple entre entropía y caos: el universo puede aumentar su entropía mientras, simultáneamente, determinados sistemas desarrollan formas extraordinariamente complejas de organización.

A partir de ahí aparece la información. No como una sustancia misteriosa ni como una forma alternativa de energía, sino como una propiedad funcional de determinados estados físicos: una diferencia que puede conservarse, transmitirse o utilizarse dentro de un proceso. La información necesita siempre un soporte material y está sometida a las restricciones de la física. Pero su importancia aumenta cuando una diferencia del pasado puede permanecer en un sistema y condicionar su comportamiento posterior. En ese punto, el pasado deja de ser simplemente algo que ocurrió y comienza a tener consecuencias sobre lo que puede ocurrir después.

La persistencia constituye así uno de los primeros pasos conceptuales de nuestro recorrido. Hemos utilizado el término «prememoria» para describir esa capacidad elemental de conservar efectos de estados anteriores sin necesidad

de representación, conciencia o memoria biológica propiamente dicha. No se trata de afirmar que exista una memoria rudimentaria en toda la materia, sino de reconocer que determinados sistemas pueden conservar estados o efectos de estados anteriores de manera que su historia influya sobre su comportamiento posterior. Cuando esta conservación se integra en sistemas capaces de mantenerse, reproducirse y modificar sus respuestas, la información adquiere una función nueva.

La aparición de la célula representa uno de los grandes umbrales de este proceso. La vida no consiste simplemente en poseer información genética ni en disponer de una frontera física. Surge de la integración dinámica de compartimentación, metabolismo, regulación, reproducción, intercambio con el entorno y conservación de información. La célula transforma energía y materia al mismo tiempo que mantiene una organización que, en condiciones adecuadas, puede persistir y reproducirse. La vida convierte así la conservación de determinadas relaciones en una actividad continua de mantenimiento. No detiene la transformación: utiliza la transformación para conservar una determinada organización.

Con la reproducción aparece además una dimensión histórica más profunda. La información ya no necesita desaparecer con el sistema que la contiene. Puede transmitirse a nuevos sistemas y quedar sometida a variación y selección. La evolución introduce entonces una capacidad extraordinaria: la posibilidad de construir sobre lo que ya ha sido construido. No existe una dirección universal hacia la complejidad, ni toda evolución supone progreso, pero algunas líneas evolutivas pueden acumular soluciones, modificar estructuras anteriores y conservar durante generaciones determinadas relaciones funcionales. La historia deja así de ser únicamente una sucesión de acontecimientos y se convierte en un componente activo de las posibilidades futuras.

La anticipación constituye otro cambio fundamental. Un organismo no necesita representar conscientemente el futuro para modificar su comportamiento antes de que se produzca una determinada perturbación. Los ritmos biológicos, determinados mecanismos fisiológicos y algunas formas de plasticidad muestran que la información conservada puede modificar el presente en función de condiciones que todavía no se han manifestado. La anticipación, por tanto, no requiere conciencia. Es suficiente con que un sistema haya incorporado relaciones entre estados presentes y acontecimientos futuros probables. La evolución y el aprendizaje pueden ampliar posteriormente esa capacidad hasta formas mucho más complejas de predicción y selección.

En este recorrido aparece finalmente la inteligencia. No como una propiedad misteriosa que surge de repente, ni como una consecuencia inevitable de acumular información, sino como una capacidad adicional: integrar información,

establecer relaciones entre diferentes estados posibles, construir representaciones funcionales y utilizarlas para seleccionar acciones bajo condiciones de incertidumbre. La inteligencia amplía la capacidad de un sistema para utilizar su historia. Ya no se limita a conservar información o responder mediante mecanismos heredados; puede comparar posibilidades, modificar estrategias, aprender de la experiencia y actuar sobre el entorno de maneras cada vez más flexibles.

La relación con la energía adquiere entonces una importancia especial. La inteligencia no crea energía ni puede escapar de las restricciones termodinámicas. Su capacidad consiste en modificar la organización y el momento en que se realizan determinadas transformaciones. Un sistema capaz de utilizar información puede decidir cómo distribuir recursos, cuándo actuar, qué alternativa seleccionar o qué estructura construir. La información adquiere así una función organizadora respecto de los procesos que utilizan energía. Esta relación no convierte información y energía en magnitudes equivalentes; simplemente muestra que una determinada organización de la información puede modificar profundamente la manera en que un sistema utiliza las posibilidades físicas de las que dispone.

La tecnología lleva esta capacidad un paso más allá. La información que antes permanecía principalmente dentro de organismos puede comenzar a exteriorizarse mediante herramientas, lenguaje, escritura, imágenes, máquinas y sistemas de procesamiento. El soporte de la información cambia, aunque nunca desaparece su dimensión física. Una solución biológica puede convertirse en una conducta; una conducta puede convertirse en una herramienta; una herramienta puede integrarse en una tecnología; una experiencia puede transformarse en conocimiento; y el conocimiento puede almacenarse en estructuras capaces de sobrevivir al individuo que lo produjo. La historia acumulada comienza así a escapar parcialmente de los límites de la transmisión biológica.

Llegados a este punto, la pregunta deja de ser exclusivamente biológica. Si determinados sistemas físicos pueden conservar información, utilizarla para regularse, transmitirla, acumularla y ampliar mediante ella sus posibilidades de transformación, ¿podría tratarse de una posibilidad más general de la materia cuando concurren determinadas condiciones? No sabemos la respuesta. Tampoco sabemos si la vida terrestre representa un acontecimiento excepcional, una posibilidad recurrente o una fase dentro de procesos mucho más amplios. La existencia de inteligencia en la Tierra no demuestra que el universo tienda hacia ella. Del mismo modo, la existencia de organización no demuestra que el universo tenga como finalidad producir organización.
Esta es probablemente la distinción más importante que debe conservarse al terminar el libro. La hipótesis propuesta no afirma que el universo tenga un

propósito. No afirma que la materia tienda inevitablemente hacia la vida. No afirma que la inteligencia constituya el destino de la evolución. No afirma que la información sea una sustancia cósmica ni que pueda existir independientemente de un soporte físico. Y tampoco afirma que el incremento de complejidad sea una ley universal. Lo que propone es algo mucho más limitado y, precisamente por ello, más susceptible de investigación: que determinadas condiciones físicas pueden permitir la aparición de sistemas capaces de conservar información sobre sus estados anteriores y utilizar esa información para modificar sus estados posteriores, ampliando en algunos casos sus posibilidades de organización y transformación.

La expresión «evolución cósmica de la información» debe entenderse, por tanto, en este sentido restringido. No sería la evolución de la información como si esta fuese un organismo o una sustancia independiente, sino la evolución de los sistemas capaces de conservarla, transmitirla, combinarla y utilizarla. Desde esta perspectiva, lo que cambia a lo largo de la historia no es solamente la cantidad de materia organizada, sino también la capacidad de determinados sistemas para conservar parte de su historia y utilizarla en la construcción de nuevos estados. La información pasa entonces de ser una diferencia conservada a convertirse, bajo determinadas condiciones, en un recurso para la organización.

Esta hipótesis permanece abierta a ser refutada o corregida. Podría ocurrir que no exista ninguna relación general entre acumulación de información y aumento de capacidad organizativa. Podría ocurrir que la organización aparezca con independencia de una acumulación histórica significativa. Podría ocurrir que la inteligencia constituya una rareza evolutiva sin continuidad fuera de la vida terrestre. Podría ocurrir incluso que nuestra interpretación esté condicionada por nuestra propia naturaleza: somos sistemas que conservan información, construyen modelos y buscan relaciones, y quizá proyectamos inevitablemente esas propiedades sobre el universo que estudiamos. La posibilidad de estar equivocados no debilita la pregunta; forma parte de su legitimidad científica.

Sin embargo, existe un hecho que no podemos ignorar. En algún lugar del universo conocido, la materia ha alcanzado un nivel de organización capaz de conservar información, reproducirse, evolucionar, aprender, anticipar, construir modelos, transformar el entorno y preguntarse por el origen de todo ello. Una parte de esa materia ha producido organismos capaces de convertir su experiencia en conocimiento y su conocimiento en nuevas formas de organización. No sabemos si somos una excepción o una fase. No sabemos si la inteligencia será una propiedad efímera de la evolución terrestre o si puede aparecer repetidamente cuando determinadas condiciones físicas coinciden. No sabemos si las formas tecnológicas de procesamiento de información constituyen una prolongación de la evolución biológica o una transición hacia algo que todavía carece de nombre.

Lo que sí podemos afirmar es que la historia conocida de la materia contiene una sucesión extraordinaria de capacidades emergentes. La transformación permite la persistencia; la persistencia permite conservar diferencias; las diferencias conservadas pueden constituir información; la información puede participar en la autorregulación; la reproducción permite transmitirla; la evolución permite modificarla y acumularla; el aprendizaje permite utilizar la experiencia; la anticipación permite actuar antes de determinadas consecuencias; la inteligencia permite construir modelos y seleccionar posibilidades; y el conocimiento permite que esos modelos sean compartidos, acumulados y transformados por generaciones sucesivas. No sabemos si esta cadena constituye una propiedad general del universo. Sabemos que, al menos una vez, ha ocurrido.

Quizá por eso la pregunta más profunda no sea «¿hacia dónde va el universo?», sino «¿qué condiciones permiten que aparezcan sistemas capaces de preguntárselo?». Esa modificación aparentemente pequeña cambia completamente nuestra perspectiva. Ya no necesitamos atribuir al universo una voluntad ni una finalidad. Podemos estudiar las condiciones físicas que permiten que aparezcan sistemas capaces de conservar historia, utilizar información y ampliar sus posibilidades de transformación. Podemos investigar si esas condiciones son extraordinarias o relativamente frecuentes. Podemos buscar vida fuera de la Tierra. Podemos estudiar otros sistemas de organización. Podemos analizar los límites físicos de la información. Podemos observar hasta dónde puede llegar la inteligencia y dónde aparecen sus límites.

El libro termina, por tanto, donde realmente comienza la investigación que todavía no podemos resolver. La hipótesis permanece abierta. También permanecen abiertas sus posibles consecuencias. Si la relación propuesta fuese exclusivamente terrestre, nuestra historia podría constituir una singularidad. Si fuese una posibilidad más general de la materia, entonces la vida y la inteligencia podrían ser manifestaciones locales de un proceso físico mucho más amplio. Y si además la información desempeñara un papel fundamental en esa dinámica, quizá tendríamos que reconsiderar nuestra manera de entender la relación entre materia, energía, vida e inteligencia.

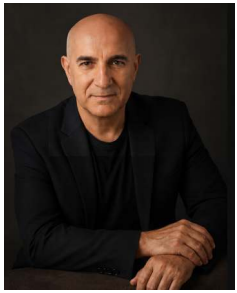
No sabemos todavía cuál de estas posibilidades es correcta. Pero quizá no sea necesario saberlo para reconocer la importancia de la pregunta. La ciencia avanza precisamente allí donde una explicación provisional puede convertirse en una cuestión susceptible de ser examinada, corregida o abandonada. Este libro no pretende haber encontrado una respuesta definitiva, sino haber construido un marco desde el que esa pregunta pueda formularse con mayor precisión.
Al principio buscábamos una relación entre energía e información. Al final hemos encontrado una cuestión mucho más amplia: la posibilidad de que algunos sistemas físicos, al conservar su historia y utilizarla para modificar sus transforma-

ciones, desarrollen progresivamente nuevas capacidades de organización. La vida sería entonces una de las formas conocidas de esa integración; la inteligencia, una de sus posibilidades más complejas; y el conocimiento, la capacidad de un sistema para convertir parte de su propia historia en representación del mundo que lo contiene.

No sabemos qué habrá después de la inteligencia. Tampoco sabemos si necesariamente habrá algo. Quizá la evolución tecnológica constituya una nueva forma de conservar y procesar información; quizá sea únicamente una fase pasajera. Quizá otras formas de organización sean posibles y todavía no podamos imaginarlas. Quizá la vida desaparezca mucho antes de alcanzar cualquiera de esas posibilidades. El futuro no está escrito en la estructura del pasado.

Pero el pasado sí puede intervenir en el futuro cuando un sistema consigue conservarlo. Y esa quizá sea la idea fundamental que queda después de todo el recorrido: la materia no solamente cambia; en determinadas condiciones, puede conservar las consecuencias de sus cambios. Cuando esa conservación se integra con la regulación, la reproducción, la evolución, el aprendizaje y la anticipación, la historia comienza a adquirir capacidad para intervenir sobre lo que todavía no ha ocurrido. Cuando esa historia puede convertirse en modelo, aparece la posibilidad de seleccionar entre futuros. Y cuando un sistema puede preguntarse por el proceso que lo ha producido, la materia alcanza una nueva forma de relación consigo misma.

No sabemos si esto representa una excepción, una fase o una propiedad más profunda del universo.
Solo sabemos que ha ocurrido.
El proceso continúa.



CHICOTE CFC

Mi trayectoria intelectual no se ha forjado en el aislamiento de una única disciplina, sino en la intersección crítica entre la observación de la realidad, el análisis de los procesos complejos y la necesidad de formular preguntas allí donde el conocimiento disponible todavía no ofrece respuestas definitivas. Como pensador independiente y teórico transdisciplinar, he dedicado años a explorar las relaciones que pueden establecerse entre materia, energía, información, organización y vida, buscando comprender cómo determinados sistemas físicos pueden conservar las consecuencias de sus transformaciones y utilizarlas para modificar sus estados posteriores.

Orden sobre el caos. La madurez del universo nace de esa investigación y de una pregunta que atraviesa todo el ensayo: ¿puede existir una relación más profunda entre la transformación de la energía, la conservación de la información y la aparición progresiva de sistemas capaces de organizar sus propias transformaciones? El punto de partida no es afirmar que el universo tenga un propósito ni que exista una tendencia universal hacia el orden, sino examinar cómo, dentro de un universo regido por la transformación y el aumento global de la entropía, pueden surgir y mantenerse estructuras locales capaces de conservar información, autorregularse, reproducirse, acumular historia, anticipar cambios y, finalmente, desarrollar formas cada vez más sofisticadas de procesamiento de información.

El libro propone así un recorrido que comienza en la física de la energía y la entropía y atraviesa la persistencia, la información, la organización, el origen de la vida, la acumulación histórica y la anticipación hasta llegar a la inteligencia y a la capacidad tecnológica de externalizar información. No pretende presentar esta secuencia como una ley de la naturaleza ni como una evolución inevitable hacia una mayor complejidad. Se trata, más modestamente, de explorar una hipótesis: que determinadas condiciones físicas pueden permitir que la materia conserve información sobre sus estados anteriores y que algunos sistemas lleguen a utilizar esa información para ampliar sus posibilidades de organización y transformación.

Al firmar esta obra bajo el nombre de Chicote CFC, asumo el compromiso de mantener esa investigación dentro de los límites que separan el conocimiento establecido de la interpretación y de la hipótesis. El propósito no es sustituir la ciencia por una explicación cerrada, sino utilizar el conocimiento científico disponible como punto de partida para formular preguntas que puedan ser examinadas, discutidas e incluso refutadas. Porque quizá la cuestión más profunda no sea solamente cómo surgieron la vida o la inteligencia, sino qué condiciones físicas hicieron posible que un universo en permanente transformación llegara a contener sistemas capaces de conservar su historia, utilizarla para intervenir sobre su futuro y, finalmente, preguntarse por el propio universo del que forman parte.