

EL PROBLEMA DE LA RELACIÓN
ENTRE AUTONOMÍA
E INFORMACIÓN EN LA
ESTRUCTURA DE LA
ORGANIZACIÓN BIOLÓGICA

ÁLVARO MORENO

ABSTRACT. Autonomy and information appear as two fundamental but opposite principles in biological organization. The origin of autonomous systems is conceivable as some natural development of the physico-chemical mechanisms that rule self-organizing processes, whereas information seems to be an organizational principle incompatible with the former. However, the origin of information can be linked with the development of a new stage in the evolution of autonomous systems, that of their insertion in a collective meta-system. Thus, information becomes fundamental in the generation of new ways of organizational dependence of individual systems regarding to a wider spatial and temporal organization.

KEY WORDS. Autonomy, information, code, biological organization, meta-network, dynamic decoupling, operational closure, evolution, natural selection, registry.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de los impresionantes avances realizados por la biología en este último siglo, la verdadera naturaleza de la organización básica de la vida es más que nunca objeto de controversias. Ahora que hemos penetrado en los detalles de su organización molecular, la vida se nos sigue apareciendo como un fenómeno difícil de comprender desde la perspectiva de la física y de la química. El problema no sólo reside en la dificultad de articular una explicación congruente con los principios de las ciencias físicas, sino en los desacuerdos sobre cuál es el aspecto esencial de la organización viviente. Aunque conocemos en detalle cómo funcionan los seres vivos, no terminamos de ponernos de acuerdo en el significado de esos detalles, porque en realidad tampoco hay acuerdo en cuál es la clave de la organización biológica.

Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia. Unidad Asociada de Estudios de la Ciencia (UPV/EHU-CSIC/Instituto de Filosofía) Universidad del País Vasco. Apartado 1249. 20080 Donostia, San Sebastián, España. / ylpmovea@sf.ehu.es

En las interpretaciones acerca de cuál pueda ser el principio explicativo fundamental de la organización biológica hay dos que destacan por su capacidad de articular sendos programas de investigación alternativos: la información y la autorganización ¹.

Por un lado, hoy día existe una amplia opinión que considera que los descubrimientos realizados por la biología molecular durante la segunda mitad del siglo XX permiten explicar la organización viviente como efecto de la información almacenada en el genoma. Esta opinión refleja una concepción de la organización biológica estrechamente ligada a la metáfora del ordenador, que da pie a la idea de que la morfología y parte de las capacidades funcionales de los organismos, incluido el comportamiento, están descritas en el genoma como información o “programa en lenguaje molecular”. Como esta información es generada mediante un proceso de selección natural —variaciones en el genotipo y selección retentiva en los fenotipos— en realidad el programa de investigación “informacionalista” se puede considerar desde los años cincuenta como la versión moderna del propio programa de investigación darwinista. De hecho, hoy en día casi todos los biólogos formulan e interpretan los principios básicos de la evolución en términos informacionales.

Por otro lado, la forma en que los seres vivos interactúan con su entorno, renovando continuamente su estructura interna y adaptando su actividad a las cambiantes condiciones externas, constituye una clara manifestación de la capacidad de autorganización de la materia. Esta es entendida como un principio universal por el que conjuntos de elementos materiales interrelacionados, en determinadas condiciones de contorno, tienden a generar espontáneamente formas de orden y mantenerlas a través de la disipación continua de energía. Desde esta perspectiva, la organización biológica sería esencialmente una expresión altamente compleja de este principio universal. Ahora bien, el fundamento de esta concepción de lo viviente como un fenómeno de autorganización depende, a su vez, de cuáles son las posibilidades (y límites) de generar sistemas complejos a partir de mecanismos puramente físico-químicos, sin el apoyo, por tanto, de mecanismos informacionales.

En los últimos tiempos las corrientes autorganizativas han recibido un fuerte impulso, gracias, en parte, a la aparición de nuevas teorías (engarzadas en las ciencias físico-químicas) sobre la autorganización y la autonomía ² en muy diferentes tipos de sistemas. Sin embargo, esta orientación no ha conseguido desbancar a la concepción informacionalista ni dar tampoco una explicación satisfactoria, desde sus propios presupuestos, de formas de organización complejas usualmente descritas en términos de procesos informacionales. De hecho, muchos de los defensores de esta orientación en la práctica aceptan (o se ven obligados a aceptar) como

complementarias las explicaciones informacionales (aunque tratando de restringirlas).

¿Por qué se presentan como incompatibles estas dos visiones de la organización biológica? Aparentemente, la visión de la organización biológica en términos informacionales se manifiesta en profunda oposición a la concepción de la misma como autorganización porque, en lugar de un orden que emerge en función de principios físico-químicos, como propiedad sistémica y dinámica de las interacciones de un gran conjunto de elementos relativamente simples, se considera como responsable del orden biológico a las complejas secuencias de unas macromoléculas, las cuales han sido configuradas “ciegamente” por la selección natural. Desde esta perspectiva, los organismos ya no son sistemas que se organizan a sí mismos, sino que son determinados por la información que heredan de sus predecesores. Además, al menos en su forma actual, las explicaciones informacionales son inconsistentes con el lenguaje de las ciencias físico-químicas (carácter físicamente arbitrario de las conexiones causales informacionales, referencialidad de los términos informacionales...). Esto es un problema importante para la fundamentación de la biología, ya que, como hemos dicho, las explicaciones informacionales se han apropiado de la teoría darwinista de la evolución, hasta el punto de que la explicación de cómo se crean las especies con base en la selección natural³ se hace a través de la noción de información genética⁴.

Por consiguiente, un problema fundamental en la filosofía de la biología (y en la propia biología teórica) es cómo encajar en una teoría unificada estos dos principios explicativos aparentemente incompatibles. Para abordar esta cuestión, vamos a estudiar cómo se han ido generando sistemas crecientemente complejos a partir de las formas de autorganización físico-químicas, tratando de mostrar bajo qué condiciones pudieron aparecer las primeras formas de una organización autónoma, y cómo, también, en el curso de esa primitiva evolución, debieron de surgir los primeros mecanismos informacionales. A partir de aquí, analizaremos qué papel han jugado respectivamente los principios de autonomía e información en la aparición y posterior evolución de los sistemas vivientes.

2. EL PROBLEMA DEL ORIGEN

Toda la increíble complejidad de la vida en la Tierra tiene su origen hace unos 3 800 millones de años en algunos protorganismos probablemente no menos complejos que ciertas bacterias actuales. La distancia que nos separa de estos hipotéticos primeros organismos es enorme. Desde luego, mucho mayor tanto en términos temporales como en grado de complejidad, que la que separa a los primeros seres vivos de las formas de autorganización físico-químicas que pudieron formarse espontáneamente.

Sin embargo, sabemos menos acerca de los mecanismos que han dado origen a la vida primitiva que de su evolución una vez aparecida.

En la vida, tal y como la conocemos hoy en día, ni la información puede existir al margen de la maquinaria metabólica de la célula ni ésta, dada su complejidad, es concebible sin aquélla. Si nos situamos en el comienzo de la evolución prebiótica, la cuestión que se plantea es qué tipos de sistemas debieron desarrollarse antes de aparecer la organización celular básica que conocemos.

Las teorías sobre el origen de la vida suelen dividirse entre las que sitúan la aparición del metabolismo como etapa primordial y las que, por el contrario, ponen el acento en la aparición de la información. Aunque existe un amplio consenso en que muy pronto uno y otro —el metabolismo y la información— debieron complementarse estrechamente, el debate es si la información surgió a partir de algún tipo de organización metabólica previa o si, por el contrario, surgió primero algún tipo de poblaciones o redes de moléculas autorreplicativas que, al evolucionar por selección natural, generaron alguna forma de memoria o información, y ésta permitiera la formación de sistemas metabólicos.

El primer planteamiento —el de la primacía del origen del metabolismo— nos lleva precisamente al problema del origen de la autonomía, pues desde esa perspectiva el paso fundamental fue la aparición de un sistema capaz de automantenerse a base de renovar recursivamente sus propios componentes. En este planteamiento, la ulterior aparición de la información sólo constituiría un perfeccionamiento de la organización básica de la vida, no una condición de la misma.

El segundo planteamiento —el de la primacía del origen de los sistemas evolutivos por selección natural— en cambio, está íntimamente ligado a la aparición de la información, pues se considera que el paso esencial de la evolución prebiótica fue la formación de una especie de memoria materializada en ciertos componentes autorreplicativos. Sólo gracias a la estructura que vehículan estos componentes podría alcanzarse y desarrollarse la complejidad organizativa que asociamos a la vida.

Sea como fuere, el problema es que ambos escenarios requieren moléculas altamente complejas, cuya síntesis (y replicación) plantea serias dificultades. Los componentes enzimáticos necesarios para controlar los metabolismos más primitivos conocidos actualmente dependen de componentes informacionales pero, a su vez, es difícil explicar la síntesis y replicación de moléculas con capacidades informacionales sin la existencia previa de una mínima organización metabólica. Parece razonable, pues, suponer que las organizaciones metabólicas instruidas debieron venir precedidas por algún tipo de organizaciones automantenedas no instruidas, en cuyo interior pudieran darse las condiciones para la formación de componentes moleculares más complejos, capaces de realizar

ulteriormente tanto funciones informacionales como enzimáticas. Por consiguiente, es fundamental explicar cómo puede aparecer un *sistema autónomo mínimo*, esto es, una organización mínima capaz de gestionar los flujos de energía y de intercambio de materiales necesarios para su mantenimiento y reproducción en un entorno variable.

3. EL ORIGEN DE SISTEMAS AUTÓNOMOS

En las formas de autorganización que pueden formarse espontáneamente, como los huracanes, una parte sustancial de la organización críticamente necesaria para su existencia se encuentra fuera del sistema. Por eso, tales sistemas son completamente dependientes de condiciones de contorno externas. En cambio, un sistema autónomo es, por definición, un tipo de sistema cuya organización interna contribuye activamente, modificando las condiciones de su entorno, a su propio mantenimiento. Es, pues, una forma de autorganización más compleja, pues supone que el sistema en cuestión genere y mantenga recursivamente una organización interna suficientemente compleja y plástica, y, al mismo tiempo, dotada de cierta estabilidad.

La aparición de este tipo de sistemas requiere dos condiciones fundamentales: 1) internamente, un tipo de organización basada en constricciones locales y específicas, y 2) externamente, un escenario temporal y espacialmente mucho más amplio que el requerido para la formación de los sistemas disipativos simples. Esto es al fin y al cabo lógico, pues de lo contrario resultaría muy improbable la formación de cantidades significativas de agregados moleculares de cierta complejidad.

La primera condición nos lleva del escenario puramente físico al mundo químico, pues la aparición de organizaciones autónomas no sería posible sin contar con las capacidades de transformación (material y energética) y de combinación constructiva que despliegan en especial ciertas moléculas. Sólo el mundo de las interacciones químicas proporciona un espectro de mecanismos de regulación y control lo suficientemente variado para posibilitar que la organización disipativa de un sistema contribuya a su propio mantenimiento de una forma plástica y flexible, en función de las condiciones de su entorno. La razón reside en que en un sistema meramente físico es mucho más difícil que en otro específicamente químico generar estructuras susceptibles de actuar como nuevas constricciones locales y apoyarse en ellas para generar nuevas formas de organización disipativas. En cambio, en los sistemas disipativos químicos los patrones globales se generan precisamente a través de la producción de nuevos componentes, cuyas estructuras “se reclutan” para posibilitar nuevas formas de organización. Así, los sistemas disipativos específicamente químicos abren la posibilidad de crear un número en principio

ilimitado de nuevas organizaciones a través de la creación de constricciones locales basadas en la estructura termodinámicamente conservativa de ciertos componentes producidos en el curso del proceso disipativo.

Los sistemas autorganizativos químicos permiten, pues, la aparición de redes recursivas de producción de componentes (o redes autocatalíticas). En ciertas condiciones de contorno y lapsos de tiempo suficientes, estas redes pueden generarse espontáneamente. Lo interesante de estas redes es que la producción de determinados componentes puede modificar la organización global de la red, creando una nueva estructura autocatalítica basada precisamente en las nuevas reacciones catalizadas por dichos componentes, los cuales, a su vez, son reproducidos recursivamente por la nueva organización. En otras palabras, en este tipo de redes recursivas es posible la aparición ilimitada de nuevas *funciones* a través de la producción de nuevos componentes que contribuyen de alguna manera al mantenimiento del sistema (Csanyi, 1989; Moreno, Umerez y Fernández, 1994; Bickhard, 2000).

Desde los años cincuenta se han realizado diversas investigaciones teóricas tratando de construir modelos de sistemas autónomos mínimos sobre la base de redes autocatalíticas. En esta línea, podemos citar los trabajos pioneros de Rosen sobre los sistemas de reparación metabólica (MR) (Rosen, 1971, 1973), los modelos de las redes autocatalíticas de Farmer, Packard y Kauffman (1986) y, en el campo de las llamadas "químicas algorítmicas" los trabajos de W. Fontana (1992). Todos estos trabajos han demostrado que, a partir de una serie de consideraciones de estabilidad organizacional en sistemas químicos, tales redes poseen una organización recurrente. Ahora bien, una cosa es el análisis abstracto de las condiciones de formación y estabilidad de este tipo de sistemas y otra el de sus condiciones de aparición y mantenimiento en un entorno físico real. Desde el punto de vista energético, una red autocatalítica sólo puede automantenerse si genera un mecanismo recursivo capaz de compensar el tránsito espontáneo de formas de energía ordenadas a desordenadas, pues los procesos de mantenimiento de la organización del sistema requieren trabajo, esto es, flujos directivamente constreñidos de energía. En otras palabras, un sistema automantenido sólo puede surgir cuando es capaz de establecer el conjunto de acoplamientos que permitan que el flujo de materia y energía que lo atraviesa se invierta en su propio mantenimiento. Esto implica, como han argumentado Bro (1997) y Kauffman (2000), la necesidad de acoplar las reacciones exergónicas con las endergónicas, de forma que el sistema "utilice en su propio beneficio" las formas de energía disponibles. A su vez, los flujos de energía constreñidos sólo pueden ser usados funcionalmente (es decir, en forma de *trabajo*) si renuevan recursivamente las constricciones (por ejemplo, en la célula los

componentes enzimáticos) que permiten que la energía se utilice de nuevo para realizar trabajo (Atkins, 1984; Kauffman, 2000).

Además, un sistema autónomo debe asegurar que sus componentes básicos estén presentes en concentraciones suficientemente altas. Esto puede ocurrir en un sistema abierto sobre una superficie mineral, por ejemplo (Wächterhäuser, 1988), pero sin un borde físico el sistema no tiene modo de controlar, modificando activamente las condiciones de su entorno, su propio mantenimiento. Así pues, un sistema autónomo con un mínimo de capacidad adaptativa requiere la construcción de un borde físico (una membrana semipermeable) que lo separe del entorno, creando y manteniendo interacciones internas diferentes de las que ocurren en el exterior, tal y como ha enfatizado la escuela autopoietica de Maturana y Varela (Varela *et al.*, 1974). Sin embargo, la función de dicho borde físico no puede ser únicamente la de actuar como un límite global sobre los procesos que él encierra, pues sin realizar también un control de los flujos de materia y energía entre el interior y el exterior del sistema (regulando las concentraciones y tipos de componentes en el interior) el sistema estallaría por causa de una crisis osmótica. Por eso, el tipo de borde físico que se requiere para la realización de un sistema autónomo mínimo implica la presencia al menos de dos tipos de componentes básicos: 1) unos componentes estructurales que puedan autoensamblarse y encerrar físicamente al sistema, y 2) unos componentes funcionales capaces de realizar tareas como catálisis, transporte activo y transducción de energía, que son necesarias para el mantenimiento viable de una red autocatalítica encapsulada. La membrana, pues, no sólo define la frontera física del sistema y actúa como constricción global (como sostiene la escuela autopoietica) sino que controla activa y funcionalmente el tipo de interacciones con el entorno (Ruiz-Mirazo y Moreno, 2000).

Así pues, podemos hablar de la aparición de sistemas autónomos una vez formadas redes autocatalíticas autoencerradas en membranas selectivamente permeables y capaces de gestionar activamente (con su entorno) los intercambios de materia y energía necesarios para el mantenimiento de dicha organización. Tales sistemas pueden ser ya considerados como verdaderos *agentes*, cuyos comportamientos autorganizados modifican adaptativamente las condiciones de un entorno variable de manera tal que contribuyan al mantenimiento del *sujeto* de dichas acciones. De aquí el carácter intrínsecamente funcional de los procesos que ejercen los sistemas autónomos y, al mismo tiempo, los constituyen ⁵.

¿Qué limitaciones estructurales tendrían tales hipotéticos sistemas? ¿Hasta qué punto podemos considerarlos —como hace la escuela autopoietica— como realmente vivos? Ciertamente, poseerían un verdadero metabolismo y, a través de él, serían capaces de dirigir adaptativamente sus propias formas de interacción con su entorno, dentro de ciertos

márgenes de variabilidad. No obstante, en tales sistemas, los mecanismos y componentes responsables del mantenimiento disipativo de la organización no serían independientes de la propia dinámica que ellos contribuirían a mantener. En estas condiciones, complejidad y robustez resultarían cada vez más incompatibles, pues cuanto más complejas fueran las organizaciones que se crearan, más vulnerables serían a determinadas perturbaciones externas. Por consiguiente, a largo plazo, este tipo de sistemas no serían viables.

4. EL ORIGEN DE SISTEMAS INFORMACIONALES

El origen de la información, que vamos a abordar ahora, requiere un análisis en dos etapas. En primer lugar, estudiaremos el origen de registros materiales, es decir, sistemas moleculares capaces de almacenar y propagar configuraciones. En la segunda parte de esta sección veremos cómo, a partir de estos registros materiales, se pudieron originar los primeros sistemas propiamente informacionales.

4.1. EL ORIGEN DE LOS REGISTROS MATERIALES

En la sección anterior hemos tomado como hilo conductor los procesos de autorganización que habrían llevado a la formación de sistemas autónomos mínimos, esto es, la manera en que determinados conjuntos de componentes materiales podían formar *organizaciones* automantenidas. Ahora, en cambio, vamos a estudiar las formas en que un determinado orden se puede conservar y propagar. En otras palabras, cómo determinados componentes pueden agruparse y formar una *estructura* capaz de propagarse a partir de la presencia de dichos componentes elementales.

¿Por qué en un caso hablamos de organización y en el otro de estructura? Porque mientras en el primer caso el sistema creado es un patrón dinámico alejado del equilibrio, disipativo, en el segundo la base del mecanismo de la propagación reside en la particular estructura de un agregado conservativo, en equilibrio termodinámico (Eigen y Winkler, 1983). Por ello estamos hablando de dos formas de orden bien distintas. En el primer caso, el orden surge como consecuencia de un flujo de energía que, en determinadas condiciones de contorno, genera y estabiliza una fluctuación macroscópica (Nicolis y Prigogine, 1977). Es un orden disipativo y causalmente circular, pues el patrón se mantiene a sí mismo. Estos patrones son termodinámicamente inestables, mientras que en el segundo caso el orden es una estructura estable, termodinámicamente en equilibrio.

De la diferente naturaleza de estas dos clases de orden —disipativo y conservativo— se deduce que mientras en el primer caso el problema del mantenimiento (y propagación) está ligado a su propia organización (en

el marco de unas determinadas condiciones de contorno), en el segundo, en cambio, va a depender de la naturaleza física de sus componentes materiales y de una determinada estructura tridimensional (3D), derivada de sus componentes básicos. El hecho que nos interesa aquí es que ciertas estructuras conservativas van a presentar una notable propiedad: la de actuar como un molde o plantilla que, en presencia de los adecuados componentes básicos, los estructura de forma tal que produce repetidamente copias de sí misma.

Este proceso de ordenamiento se desencadena como consecuencia de que la estructura conservativa inicial, en presencia de componentes básicos adecuados, tiende a ordenarlos según su propio patrón simplemente por razones físico-químicas. Así, partiendo de una situación alejada del equilibrio en la que los componentes básicos están distribuidos heterogéneamente, al final del proceso éstos terminan estructurados según un patrón repetido y en una situación de equilibrio.

El principio de la copia por molde reside, pues, en una forma de ensamblaje gobernado por las fuerzas físico-químicas, donde una determinada estructura actúa como molde, de forma que el resultado es la producción de una copia de dicha estructura. Determinados materiales (*vgr.*, un cristal) tienen esta capacidad de actuar como moldes, de manera que, en presencia de los componentes básicos, catalizan su propia replicación. Así, la estructura de los componentes del molde actúa como un principio *informador* que selectivamente impone sobre los componentes básicos libres su ordenamiento o configuración específica, y de esta manera forma sucesivamente nuevas copias de sí misma.

Pero para que esta capacidad básica de copia por molde pueda propagar en principio formas de ilimitada complejidad, el tipo de estructura 3D, de la que depende la capacidad de copia por molde, debe estar desligada de la configuración que constituye la forma a propagar. Y esto sólo ocurre en moldes modulares, es decir, en moldes formados por cadenas de subunidades-tipo, tales que su orden lineal concreto no altere (salvo excepciones) la capacidad de copia del conjunto de la estructura. Por tanto, este desligamiento se hace a través de la ubicación de la forma en el nivel lineal (1D), esto es, en la secuencia de las subunidades tipo. El rasgo más significativo de los moldes modulares, es pues, que la estructura global no se ve, en principio, sustancialmente alterada por la forma particular de ordenación de sus componentes básicos, y esto sólo es posible en la medida en que sus diferentes estados sean energéticamente degenerados. Ello permite la potencial utilización de las configuraciones aperiódicas de módulos para albergar y propagar una especie de registro digitalizado (en su configuración secuencial) de indefinida complejidad. Esto es importante porque este registro puede ser reclutado para establecer las organizaciones autónomas analizadas en la sección anterior.

El problema es, sin embargo, explicar cómo se han podido originar naturalmente tales moldes modulares, ya que los ejemplos actualmente conocidos, como los RNAs, requieren procedimientos de síntesis demasiado complicados. Incluso en condiciones artificiales, la síntesis de moldes modulares (von Kiedrowski, 1986; Rebek, 1994) requiere la utilización de monómeros activados y quiralmemente homogéneos, y además, la participación de catalizadores externos o de una compleja red de catálisis cruzadas (*vgr.*, el hiperciclo {Eigen y Schuster, 1979}). Razonablemente, pues, el origen de moldes modulares sólo se habría podido dar en el marco de sistemas autónomos prebióticos como los descritos en la sección anterior. Una vez producidos, las configuraciones secuenciales de estos moldes modulares habrían empezado a actuar como instrucciones para la especificación de complejos componentes funcionales, generándose una especie de asociación entre la red metabólica y los componentes portadores de las instrucciones.

Así pues, una vez producidos al azar en los sistemas autónomos, los moldes modulares podrían ser reclutados para estabilizar y mejorar determinadas funciones metabólicas (si su efecto no resultara letal para el sistema). A su vez, dicha actividad sostendría el proceso de síntesis y autorreplicación de los componentes modulares, en un proceso de cooperación mutua. En este contexto, la estructura lineal (secuencial) de los moldes modulares iría adquiriendo un significado funcional.

La consecuencia más importante de esta asociación sería la aparición de sistemas evolutivos por selección natural ⁶. El surgimiento de estos sistemas evolutivos estaría basado en el hecho de que las configuraciones de polímeros con capacidad de molde, al actuar como instrucciones para la síntesis de componentes catalíticos, podrían a veces comportar cambios con consecuencias funcionales globales heredables. La anterior, en un contexto de competencia entre sistemas generados por su continua reproducción, conduce a una selección de variantes. Así, los componentes autorreplicativos constituyeron un registro o memoria de unos procesos que ocurren en tiempos y espacios metaindividuales (y que se asocian a los cambios secuenciales de los componentes molde), mientras que el conjunto de los componentes funcionales de los sistemas autónomos está envuelto en un proceso dinámico disipativo que se asocia al metabolismo.

4. 2. EL ORIGEN DE LA INFORMACIÓN

Con la invención de un mecanismo que pueda ligar la evolución de los componentes funcionales más complejos a la de los moldes modulares, la organización de los sistemas autónomos mínimos pudo superar el techo de complejidad descrito en la sección anterior. En efecto, la introducción de los registros portados por moldes modulares que actúan como instrucciones para la síntesis de componentes catalíticos cada vez más específicos

cambiaría radicalmente las bases de la organización prebiótica. A partir del establecimiento de esta asociación entre moldes modulares y metabolismos instruidos, el proceso de selección natural va a poder operar configurando registros cada vez más complejos y funcionales. En consecuencia, en lugar de una organización enteramente dependiente de procesos distribuidos y generados internamente, los nuevos sistemas poseerán una organización donde los componentes más complejos se van a generar en un escenario que trasciende a su propia organización individual. Un escenario, por tanto, espacial y temporalmente mucho más amplio. La organización de los sistemas individuales va a depender de unos componentes *heredables* (o genéticos) —los moldes modulares— configurados a través de un proceso de variación y selección que implica a una enorme cantidad de individuos durante muchas generaciones, y que se transmite vía autorreproducción de las organizaciones individuales. Así, el proceso de selección natural en el marco histórico-colectivo permite la aparición de nuevos componentes genéticos portadores de especificaciones para la síntesis de componentes funcionales cada vez más complejos en los sistemas individuales.

El pleno establecimiento de esta nueva forma de organización, tal y como la conocemos en el proceso evolutivo desde al menos los últimos 3 500 millones de años en la Tierra, debió pasar por dos etapas bien diferenciadas. Como vamos a ver, este hecho fue en realidad consecuencia de un proceso de radical desacoplamiento de un tipo de procesos —los genéticos— de otros —los metabólicos— en el seno de una organización globalmente integrada. La culminación de este doble proceso de *desacoplamiento*⁷ e *integración a un nivel superior constituiría el origen de la información y, en definitiva, el de la propia organización biológica como una metarred*⁸ *formada por sistemas autónomos con capacidades evolutivas abiertas*⁹.

Probablemente, la primera forma de sistemas metabólicos instruidos por componentes hereditarios estaría basada en un mismo tipo de componentes actuando como soportes de las funciones catalíticas y genéticas (como postula el “mundo RNA”), pues esta forma de organización es mucho más simple que la actual, sostenida en dos tipos diferentes de componentes relacionados por medio de un código. Sin embargo, la limitación de un escenario como el del mundo RNA estriba en la imposibilidad de generar un proceso de evolución abierta. Ello se debe a que los tipos de componentes idóneos para la función molde y para la función catalítica son incompatibles: cuanto mejor es un tipo de componente para actuar como molde modular, peor es su versatilidad catalítica, y viceversa. Como dijimos en la sección anterior, un molde modular requiere una cuasi degeneración energética de sus subunidades tipo (pues de lo contrario las variaciones secuenciales pueden cambiar la estructura global del componente y arruinar su capacidad molde), mientras que la máxima versatili-

dad catalítica es precisamente resultado de lo contrario, de la capacidad de traducir las modificaciones secuenciales de las subunidades en variación 3D global ¹⁰. Los RNAs representan un compromiso entre ambas funciones, por lo que son candidatos idóneos para escenarios de transición, pero por eso mismo no son adecuados para soportar sistemas con capacidades evolutivas abiertas (Moreno y Fernández, 1992). De aquí la necesidad de un sistema basado en dos tipos de componentes complementarios.

Ahora bien, las potenciales ventajas de una eventual organización basada en dos tipos diferentes de componentes para tales tareas se enfrentan a una importante complicación pues se requiere, para conservar la complementariedad esencial entre ambos tipos de componentes, establecer alguna forma de emparejar sus respectivas subunidades básicas. Al no existir nexos físico-químicos inherentes entre ellas, el sistema de emparejamiento tiene que ser finalmente resultado de complejos mecanismos no lineales que involucran al conjunto de la red metabólica y, que, por consiguiente, establezcan relaciones en buena medida contingentes. Los biólogos llaman "código genético" a esta forma de emparejamiento, precisamente porque constituye un sistema estable de relación entre tipos de elementos (tripletes de bases de los ácidos nucleicos y aminoácidos de las proteínas) sin conexión causal física inherente.

Con el establecimiento de una organización basada en dos tipos diferentes de componentes (para las tareas de copia y almacenamiento de complejidad secuencial por una parte, y de actividad catalítica por otra) y vinculados de modo indirecto y complejo, los procesos ligados a los componentes moldes quedan dinámicamente desacoplados de la maraña de reacciones metabólicas del sistema. Así, la estructura secuencial de dichos componentes va a aparecer como un conjunto de unidades discretas e inertes con propiedades composicionales. Esto es, como una *forma* materializada que actúa especificando la compleja organización química del sistema sin conexión causal física directa con ésta.

Al quedar así desligados los procesos que ocurren en los componentes genéticos de las condiciones dinámicas de la autorganización metabólica, estos sistemas pueden explorar una enorme variedad de ensayos organizativos y retener selectivamente sólo aquellos que supongan alguna ventaja funcional. De este modo, la evolución va a constituir un proceso de generación y estabilización de nuevas relaciones causales por mediación de los componentes genéticos (DNA), actuando a escala de los sistemas individuales (organismos) como instrucciones que constriñen de forma específica y recursiva la dinámica de tales sistemas a través de la síntesis de los componentes funcionales (proteínas).

Todo este conjunto de procesos que ligan la complejidad de las organizaciones individuales con una (meta)organización histórico-colectiva, a

través de unos componentes cuya forma se transmite reproductivamente es lo que desde hace cincuenta años los biólogos denominan el mecanismo de la "información genética". Ciertamente, el término *información* es usado también en otros ámbitos de la biología (fundamentalmente, en el funcionamiento del sistema nervioso), y por eso hay diferencias significativas entre unos y otros tipos de información ¹¹. Pero sin duda, el relativo a la caracterización de las funciones del DNA es el más fundamental y, por tanto, también debe ser el objeto primario de nuestro análisis.

Las razones de la introducción de la terminología informacional en el núcleo de la biología molecular son complejas (Keller, 1995; Kay, 1997) y su uso con frecuencia ha dado lugar a importantes equívocos y críticas (Oyama, 1985; Smith, 2000; Maynard Smith, 2000; Sterelny, 2000; Sarkar, 2000). Por eso, una investigación sobre el significado e implicaciones de la introducción del vocabulario informacional en biología debe comenzar por el análisis del propio concepto de información y, a partir de ahí, plantear si su uso es aceptable (y hasta qué punto) para caracterizar la organización básica de la vida.

5. EL SIGNIFICADO DE LA INFORMACIÓN EN SISTEMAS ARTIFICIALES Y BIOLÓGICOS

En el sentido más genérico, la información es algún tipo de estructura que posea una capacidad referencial, la cual es independiente de las propiedades físicas de dicha estructura. Sin embargo, esta es una interpretación demasiado amplia, que tiene el inconveniente de incluir relaciones entre elementos que, en un sentido estricto, es dudoso considerar como informacionales. Para evitar una utilización demasiado vaga e incompleta del concepto de información, hablaremos de información sólo si estamos ante sistemas en los que existe una estructura de elementos tratables como formas, que mantienen relaciones estables con otros elementos de otro nivel, del que, sin embargo, están dinámicamente desacoplados.

En los sistemas artificiales la información es el resultado de una interpretación externa, y las relaciones informacionales son también obra de reglas de conexión externas, porque los componentes informacionales son estructuras materiales cuya dinámica intrínseca está completamente constreñida y como tales son (al nivel de descripción en que operan) elementos pasivos. En este marco se suele hablar de información para referirse a un conjunto de estados discretos que aparecen en un contexto en el que los soportes de dichos estados podrían adoptar otra(s) configuración(es) en un momento dado. Este sin embargo es un concepto de información basado en sus aspectos puramente formales. En realidad, este aspecto formal tiene siempre una interpretación que remite a un determinado conjunto de eventos físicos, y la misma información puede, en un marco

de interpretación distinto, remitir a eventos diferentes. Esta relación entre la información y los eventos conectados con ella es lo que se suele denominar 'significación' o 'información semántica' (Moreno, 1998).

En los sistemas biológicos, en cambio, la información no puede ser definida en términos de un sistema exterior que ya la supone, ni su significación es independiente de sus efectos causales. La información se presenta como un mecanismo que reestructura la organización material de los sistemas en los que opera, de acuerdo a una "forma" o configuración material que está dinámicamente desacoplada del sistema en el que es interpretada, pero a un nivel superior establece conexiones entre estructuras y eventos previamente inconexos. Lo característico es que esta conexión ocurre autónomamente y ello pone de manifiesto la dependencia del nivel informacional respecto al conjunto del sistema en el que opera. Por eso, a diferencia de lo que ocurre en los sistemas artificiales, donde por la acción interpretativa del observador la información aparece como independiente de sus efectos causales (dentro del sistema artificial), en los sistemas biológicos esta acción causal de la información es fundamental para su propia existencia. En la célula, la información es interpretada a través de los componentes funcionales (y sus subsiguientes acciones dinámicas) que ella misma instruye ¹². Esta es la forma más elemental de información y, precisamente por eso, en ella se solapan acción causal y referencialidad. Así, en un sistema natural la información no puede aparecer si no conlleva la construcción de su propio marco de interpretación, esto es, de los mecanismos materiales para su expresión.

Entonces, en lugar de definir y explicar la información biológica desde su uso en los sistemas artificiales, deberíamos proceder al revés, ya que en última instancia en éstos no existe como concepto autónomo.

5.1. ¿ES ACEPTABLE EL EMPLEO DEL CONCEPTO DE INFORMACIÓN PARA CARACTERIZAR LA ORGANIZACIÓN BÁSICA DE LA VIDA?

Esta pregunta plantea una objeción de alcance: si la idea de información es tan distinta en el contexto de los sistemas artificiales (que es donde se considera que existe un uso bien establecido del concepto) y en los sistemas biológicos, ¿hasta qué punto se justifica su uso en este segundo caso?

Esta objeción parte de un supuesto, a mi juicio discutible: que el concepto de información al uso en los sistemas artificiales debe servir de modelo o referencia para el caso biológico.

Una cosa es que el nuevo concepto deba ser congruente con el anterior y otra que deba incluirse en él. Nuestra hipótesis es que, precisamente porque un concepto de información genética consistente debe ser un concepto naturalizado de información, este es necesariamente más completo y global. El concepto de información genética, en concreto, no se

puede formular coherentemente sin dar cuenta de su origen, de cómo se interpreta por los propios sistemas en los que opera, o de su papel causal. En cambio, en la mayor parte de las caracterizaciones de la información en los sistemas artificiales, estos aspectos fundamentales pueden ser ignorados a efectos operativos, porque remiten implícitamente al diseñador/usuario humano. Precisamente desde la perspectiva más global del concepto de información genética que estamos analizando aquí, podemos ver las razones por las que el concepto usual de información (en los sistemas artificiales), pese a su apariencia más general, es en realidad una expresión desmaterializada y no naturalizada del mecanismo informacional. Creo por tanto que una comprensión adecuada de la organización biológica implica ciertamente la introducción del concepto de información, si bien de un concepto de información *naturalizado*.

Desde luego, este concepto debe ser congruente con la idea genérica de información, de manera que las diferencias señaladas anteriormente no afecten al núcleo básico de criterios por los que consideramos (tanto en los sistemas artificiales como en los naturales) determinadas relaciones como informacionales. En el caso de las relaciones DNA-proteínas en la célula, se cumplen estos criterios básicos, pues:

1) la relación entre el DNA y las proteínas en la célula comporta la creación de una relación estable y físicamente no inherente entre dominios diferentes y permite una interpretación en términos de mapas (referencialidad) entre ellos ¹³;

2) uno de estos dominios es descriptible en términos de acciones continuas y dependientes de la velocidad (que forman el "fenotipo"), mientras que el otro —el propiamente informacional— lo es en términos de procesos discretos e independientes de la velocidad (que forman el "genotipo") (Pattee, 1977);

3) los procesos que ocurren en el nivel de las secuencias del DNA constituyen un dominio autónomo —desacoplado— de relaciones respecto al de las relaciones dinámicas a las cuales especifica (el metabolismo informado), esto es, dicho dominio tiene propiedades composicionales.

Estos tres aspectos son característicos de las relaciones informacionales en general. En el caso de la organización biológica básica, además, sólo se comprenden en su conjunto y como la manifestación del, por un lado, desacoplamiento de los procesos genéticos de la dinámica de los procesos metabólicos y, por otro, de su conexión mutua a un nivel superior. Asimismo, dicha conexión es el principio esencial que permite la existencia de la organización biológica tal y como la conocemos. En la célula, las configuraciones secuenciales, desacopladas de la dinámica del sistema en el que se insertan, operan como una causa formal explícita sobre dicha dinámica, al imponer constricciones adicionales explícitas (a través de la maquinaria de traducción). El metabolismo, a su vez, juega un papel clave

en la expresión de la información, como ya vimos. En la célula el significado de la información consiste en la especificación de la estructura de determinados componentes funcionales altamente complejos que desempeñan papeles específicos en la construcción recursiva de la organización metabólica¹⁴. Como señala Pattee (1982) la célula es un sistema semántico producido por la interacción, complementaria y recursiva de ambos niveles, el metabólico y el informacional.

Sin embargo, en un sentido importante, el DNA trasciende a la organización celular individual, pues su contenido informacional no se genera en ella. En este sentido, la información genética es "externa" a la organización sobre la que opera como causa formal. Por supuesto, esta externalidad de la información respecto de los sistemas individuales en los que opera causalmente no viola el planteamiento naturalista, pues analizada a un nivel superior, la información genética aparece entonces como un mecanismo causal especial en una metarred globalmente recursiva. En efecto, la organización dinámica de los sistemas individuales (los fenotipos) no son sólo consecuencia de los genotipos, sino que, a su vez, juegan un papel causal "microscópico" en la lenta configuración de los componentes genéticos, pues las variaciones aleatorias de éstos son seleccionadas sólo a través de su expresión fenotípica.

6. LA INFORMACIÓN GENERA NUEVAS FORMAS DE AUTONOMÍA Y DE IDENTIDAD

Una vez aclarado el sentido en el que usamos el concepto de información, y su pertinencia para explicar la organización básica de la vida, veamos cómo su acción puede transformar al propio concepto de autonomía que hemos analizado en la sección anterior.

Ya hemos señalado que la aparición de la información fue un factor clave para la consolidación del proceso por el cuál los sistemas autónomos individuales constituyeron metarredes. En realidad, la aparición de los seres vivos supuso la irreversibilidad de su inserción en metarredes, pues su propia construcción (y no sólo su mantenimiento) se hizo radicalmente dependiente de la metarred. Así, los organismos individuales se hicieron cada vez más interdependientes y su organización básica perdió autonomía.

Esto no significa que los organismos individuales complejos no puedan ya ser considerados como sistemas autónomos. De hecho, comparados con los sistemas autónomos mínimos de los que hablamos en la sección 3, los seres vivos más complejos son, en muchos sentidos, manifiestamente más autónomos que aquellos: no sólo se autorreparan y se autorreproducen fiablemente, sino que han desarrollado una gran capacidad de

modificar su estructura y su comportamiento en función de los cambios de su entorno.

Muchas grandes transiciones de la evolución —la aparición de la sexualidad, de los organismos pluricelulares o de la comunicación y las sociedades (Szathmáry y Maynard Smith, 1995)— constituyen restricciones de la autonomía básica de los individuos. Por otro lado, la imposición de constricciones a la autonomía básica ha permitido a su vez la emergencia de nuevas y más sofisticadas formas de agencialidad, es decir, de realizar la autonomía del individuo a través de complejos sistemas (como el nervioso o el inmune) de organizar la interacción con el entorno.

La interacción entre información y autonomía que genera nuevas formas de identidad aparece en primer lugar en la propia creación de la identidad genética, y por tanto, en la constitución de los organismos biológicos más elementales. Esta forma de autonomía asegura la identidad de un organismo a través de sus cambios organizativos o estructurales ontogenéticos. No obstante, las formas de interrelación entre información y autonomía pueden modificar a su vez la identidad genética a través de diversos mecanismos de acoplamiento funcional de unos organismos con otros. Así, un sistema puede sufrir directamente la acción de la información genética ajena (p. ej., infecciones virales) o bien incorporarla, cooperando permanentemente con ella (simbiosis de identidades compartidas). Incluso puede producirse una evolución hacia la integración con pérdida de identidad de uno de los dos sistemas, como es el caso de las mitocondrias en las células eucariotas, donde las primeras han perdido enteramente su primitiva condición autónoma y terminaron convirtiéndose en un subsistema de una nueva unidad más compleja (Margulis, 1981). Esto significa algo más que la mera adaptabilidad mutua, pues la viabilidad de los organismos individuales depende en tales casos diacrónica y/o sincrónicamente de la de otros organismos. La autonomía de los sistemas individuales puede así insertarse en metasistemas colectivos, bien manteniendo su autonomía individual, como ocurre en la formación de ecosistemas ¹⁵ y colonias ¹⁶, o perdiendo dicha autonomía individual, como ocurre en el caso de la formación de sistemas individuales pluricelulares ¹⁷ (los cuales, a su vez, pueden constituir también organizaciones colectivas) (Ruiz-Mirazo *et al.*, 2000).

Todos estos diferentes desarrollos de la autonomía individual están en definitiva soportados por diferentes formas activas de la información genética en los organismos. A su vez, esta evolución ha permitido la aparición de una nueva forma de información —la información cognitiva— basada en el desacoplamiento de las funciones adaptativo-conductuales del resto del metabolismo. Este proceso es resultado de la evolución de organismos pluricelulares, cuya estrategia de vida sería dependiente del movimiento. En efecto, la imposibilidad de organizar a través del

metabolismo un control rápido, versátil y eficaz del movimiento a medida que aumentaba el tamaño, llevó a un proceso de diferenciación celular que dio lugar a la formación de un subsistema especializado capaz de conectar rápida y plásticamente las superficies efectoras y sensoras, tanto por medio del transporte químico canalizado como mediante alteraciones eléctricas en las membranas. Este es el origen del sistema nervioso. De esta manera, la actividad neuronal produjo (y desarrolló) un universo interno de configuraciones con una referencialidad externa (debido a su vinculación con los sensores y efectores) organizadas en una red automodificante¹⁸. En consecuencia, en los organismos dotados de sistema nervioso —los animales— la adaptación se produce no tanto a través de mecanismos metabólicos de autocontrol, sino, sobre todo, por vía de un metacontrol informacional sobre las funciones metabólico-motoras (Moreno, Umerez e Ibáñez, 1997). Este desacoplamiento de los procesos de control respecto del proceso global energético-material (metabolismo) del organismo permitió a los animales un incremento ilimitado en la complejidad de las funciones adaptativas sensomotrices, al desarrollar nuevas formas complejas de adaptabilidad, sobre todo en términos de comportamientos cada vez más complejos.

Con el desarrollo del sistema nervioso, los animales han sido también capaces de producir nuevas formas de comunicación interindividual, basadas en signos. Los signos se generan e insertan en el cuerpo de los organismos animales, pero a veces pueden operar como instrumentos externos que permiten extender en el tiempo y en el espacio el dominio de sus interacciones funcionales. A través de estas formas de comunicación entre animales individuales, han podido articularse nuevos sistemas colectivos mucho más complejos e intergradados, como son las sociedades¹⁹.

La creación de mecanismos informacionales tiende, por tanto, a insertar a las organizaciones autónomas individuales en redes colectivas que, por un lado, hacen más dependientes a dichas organizaciones individuales, mientras que por otro, posibilitan la aparición de nuevas y más poderosas capacidades de interacción adaptativa y, en definitiva, de autonomía compleja. Pero fundamentalmente, el sentido de la información neuronal es similar al de la información genética: crear y mantener nuevos nexos causales que han contribuido a su vez a la articulación de nuevos organismos cada vez más complejos. La información —tanto genética como cognitiva— es la base de formas complejas de acoplamiento funcional entre agentes autónomos. La información *socializa* la autonomía. Comprender la evolución significa comprender los factores que provocan la aparición de nuevas formas de información y sus consecuencias en la creación, a su vez, de nuevas formas complejas (y paradójicas) de autonomías compartidas, que, a su vez, generan nuevas formas de información, y así sucesivamente, en una red de jerarquías imbricadas.

7. CONCLUSIONES:

COMPLEMENTARIEDAD ENTRE AUTONOMÍA E INFORMACIÓN

El problema que habíamos planteado en este trabajo era la falta de articulación —cuando no la confrontación— entre los conceptos de información y autonomía en la teoría fundamental de la biología, dándose con ello lugar a dos programas de investigación diferentes, cada uno con importantes logros (pero también problemas) en su haber.

Desde la perspectiva del origen, de nuestro análisis se desprende que la autonomía es una *forma* de organización más básica que la información, pues ésta requiere algún tipo de organización metabólica. A su vez, la información, aunque en sentido completo necesita de una organización autónoma, tiene su raíz en un principio de organización radicalmente diferente, el de copia por molde. Pero ambas —autonomía e información— se complementan, pues la primera se basa en una forma compleja de autorganización disipativa que sólo es sostenible a largo plazo mediante el reclutamiento de mecanismos informacionales, y la segunda se basa en estructuras conservativas con capacidades composicionales, que a su vez necesitan, para desarrollar sus potencialidades, insertarse en una organización autónoma.

El estudio realizado muestra, por tanto, dónde residen las dificultades de articulación entre los conceptos de autonomía e información, así como por dónde avanzar hacia esa necesaria articulación. Para ello, hemos visto que debemos repensar los propios conceptos de autonomía e información, tal y como son empleados actualmente en biología. Si la autonomía es considerada desde una perspectiva puramente interna, abstracta e individual, y si la información lo es como un principio informador externo e independiente de la organización que especifica, esta articulación es imposible. Si, por el contrario, consideramos que la autonomía es una forma de (auto)reestructuración funcional de la materia que se mantiene por recursividad, la información, al fin y al cabo, debe basarse en ella articulando nuevos nexos causales y desarrollándola.

Al requerir un escenario que trascienda las organizaciones individuales en las que opera, la información aparece como un factor causal externo a dichas organizaciones individuales, pues la forma concreta de la información, de la que depende su especificidad causal, no se genera en el sistema donde ella opera. Por eso, cuanto más complejas se hacen las formas de interacción informacionales, más incompatibles pueden *parecer* con la perspectiva de la autonomía; sin embargo, cuando se analizan ambos conceptos desde la perspectiva de su origen y evolución, se hace patente la radical dependencia de la información respecto a la idea de organización autónoma y la ulterior dependencia de las formas complejas de autonomía de aquélla. Estas son las tres ideas básicas que resumen dicha interrelación:

1. La información sólo puede aparecer como un elemento causal, implicado en el mantenimiento y evolución de sistemas autónomos complejos.

2. La evolución de estos sistemas autónomos complejos constituye un proceso de generación de nuevas relaciones causales a través de (la creación de) registros informacionales. La información se origina y está siempre inserta en sistemas materiales autónomos.

3. Por consiguiente, la información es una forma de causación autónoma, inserta en el proceso evolutivo, del cual es tanto causa como efecto.

Al nivel de las organizaciones individuales, la información (tanto genética como neuronal) sólo se puede entender en el contexto de la autonomía, pues adquiere su significado a través de sus propios efectos causales. A nivel global, la información ha surgido como un mecanismo de articulación y evolución de metarredes de sistemas autónomos, ya que la aparición de relaciones informacionales ha permitido, precisamente, la creación de nuevas y más complejas formas de autonomía. Para la Naturaleza, la autonomía sin información es como esa escalera de la que habla Wittgenstein al final de su *Tractatus*, que una vez usada, hay que tirar.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la ayuda de los Proyectos de Investigación BMC2000-0764 de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología de España, y 9/upv 00003.230-13707/2001 de la Universidad del País Vasco.

- 1 La idea de que hay dos grandes principios explicativos rivales en la teoría biológica contemporánea ha sido reivindicada, de distintas maneras, sobre todo por biólogos críticos con la visión hegemónica de la vida, basada en la idea de información. Sin embargo, en la mayoría de éstos es más frecuente un rechazo a la visión predominante que la búsqueda de una síntesis. Una excepción notable en este panorama es la del biólogo J. Maynard Smith (1986), quien, al hablar de la definición de vida, constata la existencia de dos grandes concepciones opuestas (y difíciles de conciliar): una basada en la idea de vida como evolución y la otra como metabolismo. Para un análisis más detallado de esta cuestión, ver Moreno, Umerez y Fernandez (1994) y Emmeche e El-Hani, (2000).
- 2 Aunque, como estudiaremos en la sección siguiente, el concepto de autonomía tiene un contenido más fuerte y preciso que el de autorganización, implica a ésta. Por eso, es frecuente la utilización indistinta de ambos términos, sobre todo en el marco de los debates sobre cuáles son los principios explicativos de la complejidad biológica, en oposición a las explicaciones informacionistas.
- 3 La idea de selección natural (que es clave para entender la dimensión evolutiva de la vida) implica las nociones de herencia y de reproducción ventajosa de algunos rasgos, por lo que está ligada a la reproducción informacional. A su vez, la creación de nueva información genética está ligada a la selección natural.
- 4 Sin embargo, esta visión de la evolución desde fundamentos puramente informacionistas está actualmente en pleno debate (Brooks y Wiley, 1986; Wicken, 1987; Kauffman, 1993; Salthe 1993; Goodwin, 1994; Depew y Weber, 1995; Van der Vijver *et al.*, 1998). La cuestión en debate es, básicamente, la de cuál es el poder explicativo de la selección natural y de la autorganización (y cuál es su relación mutua) en los procesos evolutivos. Como lo que se evalúa y selecciona son los fenotipos, y éstos sólo están especificados informacionalmente en un grado mínimo, a su vez los mecanismos y principios de la autorganización y autonomía se reintroducen en el propio mecanismo que rige la evolución. Este problema básico se complica especialmente a partir de la aparición de organismos pluricelulares, pues con la aparición de lo que se conoce como el “proceso de desarrollo ontogenético” se plantea abiertamente el problema de la interrelación entre dicho desarrollo y el propio proceso evolutivo. El que estos procesos se expliquen de forma tan diferente y requieran modelos tan distintos se puede considerar como un síntoma de problemas en su caracterización. De aquí el debate entre las ideas de selección natural y de autorganización como mecanismos de explicación de la evolución.
- 5 Es importante señalar que las relaciones que aseguran la viabilidad constructiva y energética de un sistema automantenido no son separables de sus acciones externas, es decir, de sus interacciones funcionales con el entorno, porque el mantenimiento recursivo de los procesos internos que constituyen al sistema requiere que la organización de éste contribuya también, de forma activa, a producir ciertas condiciones en el entorno. De hecho, es la recursividad de los procesos internos y su mutua construcción lo que determina unas diferencias cualitativas con las relaciones funcionales que dicho sistema causalmente induce en su entorno. Este tipo de organización implica, por

tanto, una asimetría entre la complejidad de los procesos (internos) del sistema y la del entorno que debe ser activa y funcionalmente sostenida por el propio sistema, creando continuamente ciertas condiciones especiales en el entorno y no sólo en el propio sistema.

- 6 Contrariamente a una opinión bastante extendida, no considero adecuado hablar de evolución por selección natural en un escenario puramente molecular (esto es, en ausencia de sistemas autónomos). Primero, porque, como hemos explicado, los replicadores modulares son moléculas complejas cuya síntesis parece difícil fuera del metabolismo de los sistemas autónomos mínimos. Y segundo, porque en ausencia de estos últimos, la variedad potencial del espacio de secuencias no se corresponde con una variedad equivalente del espacio de funciones (apenas se puede considerar más que un mayor o menor grado de resistencia a la hidrólisis y de eficacia replicativa) (Wicken, 1987, p. 104).
- 7 Hablamos de desacoplamiento cuando un sistema se organiza de manera que una parte del mismo opera según reglas dinámicas independientes del resto (que funciona según principios dinámicos más básicos) y ambas partes interaccionan causalmente a un nivel superior de modo tal que dependen una de otra.
- 8 Utilizo aquí el término “metarred” para designar un sistema colectivo en el que las unidades individuales están formadas por sistemas autónomos, los cuales forman una estructura de relaciones sincrónicas y diacrónicas de las que depende su existencia individual. El sistema global es a su vez una red porque ni el conjunto puede existir sin las partes, ni éstas sin el conjunto.
- 9 Utilizo aquí el término de evolución abierta para designar todo proceso a lo largo del cual un sistema reproduce su dinámica constitutiva-funcional básica generando una variedad ilimitada de sistemas semejantes, de formas de expresión de dicha dinámica que no estén sometidas a un techo predeterminado de complejidad organizativa (Ruiz-Mirazo, 2000).
- 10 Por esta razón, la idea de P. Geoffrey-Smith (2000) de un posible sistema biológico basado en las proteínas actuando como registros y como catalizadores instruidos por esos registros, sin necesidad de un código, parte de un supuesto físicamente imposible.
- 11 En la información genética, referencialidad y acción causal son una y la misma cosa, mientras que en la información del sistema nervioso (que podemos considerar como “epistémica”) el contenido referencial —el significado— y sus efectos causales son eventos distintos.
- 12 Por eso la aparición de sistemas verdaderamente informacionales requiere al nivel individual que el “texto” de la información contenga elementos que permitan su propia interpretación. La razón de ello es que la información sólo puede ser expresada cuando (algunos de) los propios componentes funcionales cuya síntesis es informada acoplan las unidades básicas informacionales (tripletes de bases del DNA) con las piezas básicas de dichos componentes funcionales (aminoácidos), las cuales, inmediata e implícitamente, se autoensamblan e insertan en el conjunto de los procesos de auto-mantenimiento y reproducción del sistema. Así, la información es autointerpretada dinámicamente por los propios componentes que ella simbólicamente especifica. Esta es la explicación de la mutua referencia entre los mecanismos dinámicos que interpretan la información (el conjunto de la maquinaria enzimática necesaria para la expresión de la información) y el conjunto de caracteres simbólicos (las secuencias de bases del DNA) que

- especifican la síntesis de aquéllos (Pattee 1982). Por eso, a diferencia de los sistemas informacionales artificiales, se da en la célula una profunda imbricación entre la lógica (o *software*) y el soporte material (o *hardware*).
- 13 El carácter "arbitrario", desde el punto de vista fisico-químico de la relación estable entre las unidades que constituyen las secuencias de los ácidos nucleicos y las de las proteínas, se justifica porque el emparejamiento entre ambas está mediado por unas determinadas enzimas (las tRNAaminacilsintetasas) que son ellas mismas resultado del propio proceso de traducción. Por eso, el origen de esta relación es, en lo fundamental, un accidente "congelado", es decir, fijado recursivamente.
 - 14 La información genética es, pues, necesariamente autoreferencial e instructiva (no representacional). No contiene descripción de ninguna realidad previamente existente, sino sólo especificaciones para la construcción de la organización celular.
 - 15 Los ecosistemas son sistemas colectivos de gestión sostenible de los flujos energético-materiales formados por grupos diferentes, pero complementarios, de sistemas metabólicos individuales.
 - 16 Las colonias son agregados espaciales sin borde físico formados por organismos individuales sin entrañar modificaciones irreversibles en los sistemas individuales que las constituyen. Como tales, las colonias poseen una cierta estructura organizativa establemente mantenida a través de las interacciones de sus miembros.
 - 17 Un organismo pluricelular es una unidad compuesta con su propio borde físico e identidad reproductiva, que resulta de un proceso ontogenético originado a partir de una célula fecundada, cuyos descendientes van diferenciándose y formando una unidad autónoma de segundo orden hasta constituir al individuo adulto, en estado, a su vez, de sobrevivir y reproducirse. Pero esta reproducción pasa de nuevo por una etapa unicelular.
 - 18 La significación e interpretación funcional de estos patrones neuronales requiere su articulación con el resto de la actividad dinámico-metabólica del cuerpo, en interacción con el entorno.
 - 19 Las sociedades son un tipo especial de colonia, formada por organismos pluricelulares con capacidades cognitivas (es decir, animales) que implica cambios irreversibles en los sistemas individuales que las constituyen, de manera que éstos ya no pueden tener una existencia independiente de la sociedad.

REFERENCIAS

- Atkins, P. W. (1984), *The Second Law*. San Francisco: Freeman and Co.
- Bickhard, M. (2000), "Autonomy, function and representation," *Communication and Cognition - Artificial Intelligence* 17 (3-4) (A. Etxeberria, A. Moreno and J. Umerez, J., eds.) 111-132.
- Bro, P (1997), "Chemical reaction automata," *Complexity* 2 (3): 38-44.
- Brooks, D. and Wiley, E.O. (1986), *Evolution as Entropy: Toward a Unified Theory of Biology*. Chicago: University Press.
- Csanyi, V. (1989), *Evolutionary Systems and Society. A General Theory of Life, Mind and Culture*. Durham: Duke University Press.
- Depew, D. and Weber, B. (1995), *Darwinism Evolving. Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*. Boston: MIT Press.
- Eigen, M. and Schuster, P. (1979), *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-organization*. New York: Springer.
- Eigen M. and Winkler, R. (1983), *Laws of the Game. How the Principles of Nature Govern Chance*. London: Penguin Books.
- Emmeche C. e El-Hani, C. (2000), "Definindo vida". El-Hani, C. N. and Videira, A. A. P. (eds.) *Vida: A questao da biologia*. Brasil: Editorial Relume Dumará, 31-56.
- Farmer, J, Kauffman, S. and Packhard, N. (1986), "Autocatalytic replication of polymers". *Physica* 22 D: 50-67.
- Fontana, W. (1992), "Algorithmic chemistry," in C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer and S. Rasmussen (eds.) *Artificial Life II*. Redwood City: Addison-Wesley, 159-209.
- Goodwin, B. (1994), *How the Leopard Changed its Spots*. London: Weidefeld and Nicolson.
- Kauffman, S. A. (1993), *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*. Oxford: University Press.
- Kauffman, S. A. (2000), *Investigations*. Oxford University Press (caps. 3 y 4) (Versión previa de 1996 como *working paper* del Santa Fe Institute)
- Kay, L. E. (1997), "Cybernetics, information, life: the emergence of scriptural representations of heredity," *Configurations* 5: 23-91
- Keller. E. F. (1995), *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth-Century Biology*. New York: Columbia University Press.
- von Kiedrowski, G. (1986), "A self-replicating hexadeoxy nucleotide," *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 25: 932-935.
- Margulis, L. (1981), *Symbiosis in Cell Evolution*. San Francisco: W. H. Freeman.
- Maynard-Smith, J. (1986), *The Problems of Biology*. NY: Oxford University Press. (cap. 1) Ed. castellana: Editorial Cátedra (1987)
- Maynard Smith, J. and Szathmáry, E. (1995), *The Major Transitions in Evolution*. Oxford: W. H. Freeman.
- Maynard-Smith, J. (2000), "The concept of information in biology," *Philosophy of Science* 67: 177-194 y "Reply to commentaries," *Philosophy of Science* 67: 214-218.
- Moreno A. and Fernández, J. (1992), "From records to self-description: the role played by RNA in early evolutive systems," *Acta Biotheoretica* 40: 1-9.
- Moreno A., Umerez, J. and Fernández, J. (1994), "Definition of life and research program in artificial life". *Ludus Vitalis* II (3): 15-33.
- Moreno, A. Umerez, J. and Ibáñez, J. (1997), "Cognition and life. The autonomy of cognition," *Brain and Cognition* 34 (1): 107-129

- Moreno, A. (1998), "Information, causality and self-reference in natural and artificial systems," in Dubois, D. M. (ed.) *Computing Anticipatory Systems (Proceedings Collection of American Institute of Physics)*, 202-206.
- Nicolis G. and Prigogine I. (1977), *Self-organization in Non-equilibrium Systems*. NY: Wiley
- Oyama, S. (1985), *The Ontogeny of Information*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pattee, H. (1977), "Dynamic and linguistic modes of complex systems," *International Journal of General Systems* 3: 259-266.
- Pattee, H. (1982), "Cell psychology: An evolutionary approach to the symbol-matter problem," *Cognition and Brain Theory* 5 (4): 325-41
- Rebeck, J. (1994), "Synthetic self-replicating molecules," *Scientific American* 271(1): 34-40. [Publicado en castellano (1994): "Moléculas sintéticas autorreplicantes," *Investigación y Ciencia*, Sept., 20-26].
- Rosen, R. (1971), "Some realizations of (M, R)-systems and their interpretation," *Bulletin of Mathematical Biophysics* 33: 303-319.
- Rosen, R., (1973), "On the dynamical realizations of (M, R)-systems," *Bulletin of Mathematical Biophysics* 35: 1-9.
- Ruiz-Mirazo, K., Etxeberria, A., Moreno A., and Ibañez, J. (2000), "Organisms and their place in biology," *Theory in Biosciences* 119: 43-67.
- Ruiz-Mirazo, K., and Moreno, A. (2000), "Searching for the roots of autonomy: the natural and artificial paradigms revisited," *Communication and Cognition-Artificial Intelligence* 17. (3-4) (A. Etxeberria, A. Moreno and J. Umerez, J., Eds.) 209-228.
- Ruiz-Mirazo, K., (2001), *Condiciones físicas para la aparición de sistemas autónomos con capacidades evolutivas abiertas*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Inédita.
- Salthe, S. (1993), *Development and Evolution: Complexity and Change in Biology*. Boston: MIT Press.
- Sarkar, S. (2000), "Information in genetics and developmental Biology: Comments on Maynard Smith," *Philosophy of Science* 67: 208-213.
- Smith, G. (2000), "On the theoretical role of 'genetic code,'" *Philosophy of Science* 67: 26-44.
- Sterelny, K. (2000), "The 'genetic program program: A commentary on Maynard Smith on information in biology,'" *Philosophy of Science* 67: 195-201.
- Szathmáry, E., and Maynard Smith, J. M. (1995), "The major evolutionary transitions," *Nature* 374: 227-232.
- Van der Vijver, G., Salthe, S. and Delpo, M. (1998), *Evolutionary Systems. Biological and Epistemological Perspectives on Selection and Self-organization*. NY: Kluwer.
- Varela, F., Maturana, H. and Uribe, R. (1974), "Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model," *BioSystems* 5: 187-196.
- Wächterhäuser, W. (1988), "Before enzymes and templates: Theory of surface metabolism," *Microbiological Reviews* 52: 452-484.
- Wicken, J. S. (1987), *Evolution, Thermodynamics and Information. Extending the Darwinian program*. Oxford: University Press.