

BIOSEMIOTICA. UN PARADIGMA EMERGENTE EN BIOLOGIA

(Biosemiotics. An Emerging Paradigm in Biology)

Néstor CARRILLO*

Manuscrito recibido: 1996.6.26.

Versión final: 1997.4.18.

* Programa Multidisciplinario de Biología Experimental (PROMUBIE), División Biología Molecular, Facultad de Cs. Bioquímicas y Farmacéuticas, Universidad Nacional de Rosario, Suipacha 531, (2000) Rosario, Argentina.

BIBLID [ISSN 0495-4548 (1997) Vol. 12: No 30; p. 551-565]

RESUMEN: Se propone el uso de la Semiótica como herramienta integradora para investigar los aspectos fundamentales de los seres vivos. Como tal, la Biosemiótica abre nuevas perspectivas metodológicas para integrar un gran número de fenómenos aparentemente no vinculados o incompatibles entre sí. El principio básico es que la Biología, desde el nivel molecular al sistémico, puede ser estudiada como comunicación, y los procesos biológicos como interacciones mediadas por signos. La vida es definida como una propiedad sistémica de la materia. La Biología es, en sí misma y en todos sus aspectos, Semiótica Natural próxima al caos determinista. El paradigma biosemiótico es propuesto como un paso hacia la formulación de una teoría sintética de la vida, que incorpore los componentes mecanístico-moleculares, interpretaciones semióticas, y la historia natural de los sistemas vivientes.

Descriptores: Biosemiótica, Lingüística, Mecanicismo Biológico, Holismo, Gramática Generativa.

ABSTRACT: *Semiotics is introduced as an integrative approach to investigate the intimate features of living systems. As an overarching concept, Biosemiotics offers new methodological perspectives to integrate a vast number of apparently unrelated phenomena. The basic tenet is that Biology, from the molecular to the systemic level, can be investigated as communication, and biological processes as sign-mediated interactions. Life is defined as a systemic property of matter. Biology is then, in all its aspects, Natural Semiotics with a proximity to deterministic chaos. The biosemiotic paradigm is intended as a step toward the establishment of a synthetic theory of life, incorporating the molecular-mechanistic components, the semiotic interpretations, and the natural history of the living systems.*

Keywords: *Biosemiotics, Linguistics, Biological Mechanicism, Holism, Generative Grammar.*

Perutz: En un momento de su exposición, usted afirmó, cito textualmente: "La Biología no puede ser reducida a términos físico-químicos, del mismo modo que la Bioquímica no puede ser reducida a la Química". Quisiera saber en qué se basa para hacer tal afirmación.

Popper (manipulando su audífono): ¿Cómo? ¿Cómo?

Sir George Porter (Presidente de la Royal Society, gritando en su oído): el Dr. Perutz quiere saber por qué usted piensa que la Biología es irreductible.

Popper: ... Ah, sí... También me sorprendió en su momento, sí... Pero le sugiero que vaya y lo piense por una tarde, y ya verá que tengo razón.

Primera Conferencia Medawar, Royal Society, Londres, 1986

Introducción

En este artículo se formulan algunas propuestas para la construcción de una teoría general de los seres vivos, esto es, de un cuerpo de abstracciones capaz de interpretar la singularidad de la vida. Los elementos conceptuales básicos de esta teoría son:

- El paradigma mecanicista que domina la Biología actual es insuficiente para explicar por sí solo los aspectos más fundamentales de los sistemas biológicos -auto-organización, morfogénesis, diversidad.

- Se reconoce como elemento distintivo de los sistemas biológicos la capacidad para generar, transmitir, acumular e interpretar información significativa. Esta característica de la materia viva se manifiesta a todo nivel de organización, desde el atómico-molecular hasta el sistémico.

- Como corolario de las propuestas anteriores, se introduce la noción de Biosemiótica como paradigma emergente capaz de integrar un vasto conjunto de fenómenos biológicos, aparentemente no relacionadas entre sí, en un sistema teórico consistente.

El artículo no intenta presentar una teoría biológica terminada y "lista para usar", ya que no existe tal cosa, aunque sí elabora propuestas acerca de la estructura y la *forma* que dicha teoría debiera adoptar. En particular, propone reorientar hipótesis y programas de investigación en Biología a fin de incorporar elementos tales como la comunicación dentro y entre sistemas y la historia natural, que son ignorados en las descripciones puramente mecanísticas de los seres vivos. Ha sido escrito pensando en el trabajo de biólogos y bioquímicos militantes antes que en el de los epistemólogos y otros adeptos de la sistemática, por lo que no hay énfasis alguno en el rigor o sistematización de los contenidos. Es por último una versión, escrita de la única manera en que pueden hacerse estas cosas, a saber, pensando que la nuestra es la mejor.

El mecanicismo biológico como tesis y como herramienta metodológica

En trabajos históricos, y en la literatura biológica en general, se acostumbra vincular el triunfo de la concepción mecanicista en Biología con la elucidación de la estructura molecular del ADN por Watson y Crick (1953), pero la asociación es bastante engañosa. El descubrimiento mencionado tuvo en verdad un carácter más bien ejemplificador; por primera vez se demostró que el conocimiento detallado de la estructura de una macromolécula proporciona

elementos suficientes para comprender su función de manera inmediata. Su mayor virtud fue, en consecuencia, hacer evidente para la mayoría de los biólogos el valor de un programa de investigación que hasta entonces sólo algunos compartían. Sin embargo, ya desde fines del anterior siglo la Biología había comenzado a despegarse de sus orígenes puramente descriptivos, para iniciar el examen de los aspectos dinámicos del metabolismo y la bioenergética. Estos desarrollos condujeron de modo progresivo al clímax actual de la Biología Molecular: la aplicación sistemática de los métodos y conceptos de las ciencias físicas a los sistemas biológicos. Como preconcepto filosófico subyacente, es evidente que el reduccionismo mecanicista se encuentra en las raíces mismas de este desarrollo (Popper 1974, Thorpe 1974, Holliday 1988).

Definimos como mecanicista a toda doctrina que intenta explicar un fenómeno o conjunto de fenómenos exclusivamente en base a mecanismos, por oposición a explicaciones contingentes, aleatorias o *ad hoc*. Mecanismos y contingencias forman la trama misma del mundo físico, y sobre todo, de los seres vivos. Idealmente, una teoría de base mecanicista asume la existencia de un cierto número (mínimo) de mecanismos básicos, a partir de los cuales pueden obtenerse por deducción discursos explicativos para todos los fenómenos observables. La comprensión de estos mecanismos constituye el objeto de la disciplina, y permite en principio predecir la evolución de los sistemas con un cierto grado de certidumbre. Los hechos contingentes se superponen a estos procesos como "ruido de fondo", cuyo único efecto es dificultar la comprensión del mecanismo subyacente al agregar incertidumbre a las observaciones. Su valor como elemento explicativo es nulo.

La Biología Molecular representa la manifestación más intransigente de este espíritu mecanicista. No constituye una rama de las Ciencias Biológicas en el sentido en que lo son la Botánica o la Fisiología. Es más bien un punto de vista, una opinión sobre cómo debe practicarse la Biología en general. Una opinión que dice que toda la vida, su origen, su evolución y sus manifestaciones, pueden y deben explicarse en base a mecanismos de tipo físico-químico. De acuerdo con este punto de vista, es inadmisibles la existencia de leyes puramente biológicas que no puedan deducirse de las leyes fundamentales de la Química-Física. El mecanicismo biológico niega la dualidad entre la materia inorgánica y la materia viva, del mismo modo que niega, en otro nivel de fenómenos, la dualidad entre "ciencias de la vida" y "ciencias del espíritu".

La aplicación sistemática de estos principios a la Biología ha permitido progresos extraordinarios en años recientes, haciendo que el paradigma molecular adquiera una

posición dominante dentro de las Ciencias Biológicas, hasta el punto que un fenómeno biológico no se considera entendido del todo si no incluye una descripción molecular (Popper 1974, Thorpe 1974, Holliday 1988). Es interesante interrogarse acerca de las claves de semejante éxito. Desde el punto de vista de los recursos explicativos utilizados, el mecanicismo biológico es una doctrina poco sofisticada, simplificadora y notablemente rígida. Como contrapartida, proporciona las herramientas metodológicas más poderosas con que cuenta la Biología actual. El argumento más decisivo en su favor es el de la eficiencia, en tanto proporciona un programa de investigación simple y riguroso con el que interrogar a la naturaleza.

En razón de las deficiencias apuntadas, el mecanicismo biológico ha sido sistemáticamente cuestionado por diversas escuelas de pensamiento, algunas de las cuales solo tienen actualmente un interés histórico. Sobre todo a partir del "Anti-Dühring", se ha insistido acerca de una interpretación dialéctica de la naturaleza en general y de la vida en particular. Sin embargo, esta forma de razonamiento (tanto en su versión hegeliana como marxista) ha tenido escasa influencia en el desarrollo científico y de hecho, ha sido raramente utilizada, aún por los cultores del análisis dialéctico en el plano filosófico. Un ejemplo elocuente de esta incongruencia lo constituye Oparin en su "Origen de la Vida" (1978), quien filosofa como marxista y dialéctico, mientras teoriza como mecanicista. Incidentalmente, ni él ni la inmensa mayoría de sus continuadores han tratado realmente la cuestión del origen de la vida, sino del conjunto de condiciones físico-químicas que permiten el origen de la vida; se da por sentado que si algo puede ser (en términos físicos), *debe* ser. Esto es mecanicismo en estado de pureza. En un libro más reciente, Levins y Lewontin (1985), sostenedores del método dialéctico en Biología, admiten no obstante sus limitaciones en tanto programa de investigación:

La dialéctica no es, y nunca ha sido, un método programático para resolver problemas científicos. Por el contrario, el análisis dialéctico proporciona (...) un conjunto de advertencias contra formas particulares de dogmatismo y estrechez de pensamiento. (Levins y Lewontin 1985)

Otro conjunto de doctrinas biológicas no mecanicistas pueden ser agrupadas bajo el común denominador de *holismo*. En realidad se trata de varias escuelas con posiciones epistemológicas diferentes -y en algunos casos contrapuestas-, desde la psicología gestáltica de Köhler (1971) hasta la teoría orgánica de von Bertalanffy (1960). Algunas admiten componentes mecanísticos en sus descripciones, mientras que otras los rechazan por completo, pero todas coinciden en un núcleo de ideas comunes: es imposible describir el

todo a partir de ningún tipo de función lineal de las propiedades de sus componentes; el todo precede, ontológica y epistemológicamente, a las partes. También se habla de la vida como una "forma separada de la materia" (Nordenskiöld 1946), en coincidencia con el pensamiento dialéctico. Una de las exposiciones más completa de esta tendencia puede encontrarse en Elsasser (1975) quien, con su *principio de clases finitas*, ha proporcionado a mi juicio los argumentos más rigurosos acerca de *porque los sistemas biológicos no pueden ser reducidos a términos físico-químicos*. Elsasser utiliza recursos matemáticos para demostrar la diferencia ontológica existente entre la clase de objetos que estudia la Física y los que estudia la Biología, e introduce una *función organísmica* como elemento central para construir una teoría biológica general (Elsasser 1975). Aunque hay un esfuerzo consciente por definir esta función en términos formales, el grado de formalización alcanzado es escaso, y la utilidad de su aplicación como herramienta para investigar problemas científicos bastante relativa.

La conclusión inevitable de esta breve reseña -que no tiene pretensión de ser exhaustiva-, es que las diversas doctrinas alternativas utilizadas para interpretar la vida (holísticas, organísmicas, dialécticas) han hecho una contribución importante, pero limitada a criticar las limitaciones y errores de la estrategia mecanicista. En cambio, no han podido proporcionar un programa de investigación igual o mejor al programa mecanicista, capaz de ayudar a los biólogos a resolver o interpretar problemas concretos. En la siguiente sección se discuten en mayor detalle las deficiencias del mecanicismo biológico y se adelanta una propuesta al respecto.

Breve crítica del mecanicismo biológico

El programa mecanicista ha sido aplicado con éxito notable a la resolución de muchas cuestiones biológicas importantes, pero es razonable concebir que no se trata de un recurso infalible. De hecho, existen varias cuestiones puntuales que se han mostrado recalcitrantes al análisis molecular. Sin embargo, lo que se plantea aquí no es la dificultad del programa mecanicista para resolver tal o cual problema específico, sino su incapacidad para dar cuenta, *por sí solo*, de los aspectos esenciales de los sistemas biológicos: auto-organización, morfogénesis, evolución y, como manifestación característica de la vida, diversidad (Bleecken 1990). Esta incapacidad es estructural, epistemológica. El núcleo filosófico de la Biología Molecular enfatiza la unidad de todos los fenómenos biológicos -"Lo que es cierto para *Escherichia coli* es cierto para la ballena", escribió J. Watson treinta años atrás. Y es

precisamente por esa razón que el mecanicismo no puede captar el valor fundamental de la diversidad como elemento inseparable de la noción de vida.

Existe otra cuestión adicional no menos importante. La notable capacidad explicativa del paradigma mecanicista ha conducido al enunciado de una "lógica molecular de la vida" (Jacob 1976). Esta se compone de un núcleo puramente molecular con abundantes elementos termodinámicos. En muchos campos de la Biología, en Bioenergética, en Enzimología, en Evolución, se emplean a menudo argumentos economicistas, de tipo costo-beneficio, para interpretar el funcionamiento de los sistemas biológicos. Se asocia la espontaneidad de muchos procesos con estrategias generales como: aprovechar nutrientes, incrementar la eficiencia y hacer máxima la entropía del universo.

Como resultado de su propio desarrollo dialéctico, la Biología Molecular ha logrado desentrañar algunos de los mecanismos fundamentales de los seres vivos, donde esta "lógica molecular-termodinámica" brilla por su ausencia. Procesos tales como la eliminación de intrones, edición del ARN, plegamiento asistido de proteínas, etc. son decididamente antieconómicos. Todos estos procesos son redundantes en el sentido en que implican ciclos de síntesis y degradación sin producto neto, y todos podrían llevarse a cabo mediante mecanismos alternativos con un costo energético menor.

Podemos tener una perspectiva más amplia si empezamos por considerar que estos procesos no son únicamente ciego mecanismo, sino que involucran además la transmisión de información, con la máxima seguridad y fidelidad posibles. La característica más sobresaliente del flujo de información es la redundancia, y ésto ya nos habla de una lógica distinta; una lógica cuyo imperativo es que, sin importar el costo, el mensaje llegue a destino, exacto y seguro. De este modo, la lógica molecular solo se sostiene cuando se la aísla del contexto sistémico. La propia Biología Molecular nos enseña que en el comportamiento de los sistemas biológicos, la lógica informativa tiene preeminencia sobre la termodinámica, toda vez que los procesos fundamentales de los seres vivos ocurren por mecanismos energéticamente ineficientes, pero que garantizan la transmisión del mensaje.

Acceder a esta lógica, con sus signos, códigos y algoritmos, aparece así como un objetivo de capital importancia en Biología. ¿Con qué elementos cuenta el investigador para abordar estos problemas? En realidad, el estudio de códigos y mensajes es una actividad consolidada en las Humanidades. La Semiótica se ocupa específicamente de este tipo de cuestiones, y ha desarrollado una batería completa de conceptos y métodos para estudiarlas. Parece razonable, aunque más no sea como ejercicio, explorar si la aplicación de estos recursos a la Biología es capaz de enseñarnos algo nuevo acerca de los seres vivos.

Semiótica - Una doctrina de los Signos y los Mensajes

De una forma simplificada, el objeto de la Semiótica es el estudio de los mensajes y su significado. Puesto que todo mensaje está compuesto de signos, la Semiótica es una doctrina de los signos y como tal forma parte de la Lingüística. El lenguaje es el sistema de comunicación por excelencia del hombre, y la marca misma de la humanidad, y la Semiótica intenta desarrollar una ciencia con la cual comprender los signos y los elementos universales del idioma. Proporciona una base con la que interpretar los lenguajes formales, así como una teoría de códigos, y encara estudios de gramática comparada a fin de obtener información sobre la ontogenia y la filogenia de las lenguas.

El término Semiótica fue introducido en el discurso filosófico por Locke a fines del siglo XVII. No obstante, sus bases sistemáticas fueron establecidas recién durante la primera mitad del presente siglo por Peirce (1934), quien fue el primero en percibir el enorme potencial de la misma como *órgano o instrumento de todas las ciencias*. Además de la Semiótica pura que elabora terminologías científicas adecuadas para el mundo del significado en el lenguaje humano, los principios semióticos pueden ser aplicados a cualquier sistema de signos y señales (Eco 1976). Por lo tanto, introducimos aquí el término *Antroposemiótica* en un sentido restringido para describir la rama de esta disciplina que se ocupa específicamente del lenguaje humano. Fuera de este contexto, determinado en gran medida por la organización social y la cultura, nos preguntamos si existen otros códigos "naturales"; y si es así, en que nivel de organización operan y cuán extendidos se encuentran en la naturaleza. La siguiente sección intenta responder, al menos en parte, a estos interrogantes.

Los códigos y señales de la materia viva

"*El universo está repleto de signos*" (Peirce 1934). Esta visionaria cita anticipa el argumento enunciado aquí para los seres vivos: el funcionamiento de los mismos está siempre asociado a la transmisión, recepción e interpretación de información significativa. Los sistemas biológicos operan a través de códigos, que se manifiestan en todos los niveles de organización y cuya comprensión permite acceder a las aspectos esenciales de la vida. El más elemental de tales códigos es probablemente el código genético. Se lo asocia comunmente con el descubrimiento de la estructura del ADN, pero en realidad la secuencia de nucleótidos de éste no enseña gran cosa sobre la posible naturaleza del código. Esto último sería equivalente a suponer que el conocimiento del alfabeto cirílico permite automáticamente entender el ruso. El desciframiento del código genético fue producto de laboriosos estudios,

que insumieron casi una década, en los laboratorios de Nirenberg, Khorana, Ochoa y otros. La estructura del código genético es tan simple que este hecho pasa muchas veces desapercibido.

Un código molecular diferente y a la vez complementario del código genético establece a su vez las reglas de correspondencia entre anticodones y aminoácidos durante la carga de los ARN "de transferencia" para la síntesis proteica. En un nivel todavía estrictamente molecular existe un conjunto de señales que apenas comienza a descifrarse, y que determina el plegamiento funcional de las proteínas y en consecuencia, la manifestación de su actividad biológica. En libros de la década del setenta, como el conocido texto de Bioquímica de Lehninger, puede leerse que la estructura primaria de una proteína condiciona su plegamiento de una manera determinista. Los estudios posteriores han demostrado que esta expectativa, aunque básicamente correcta para condiciones *in vitro*, era en exceso optimista, y que es necesaria una compleja red de interacciones con factores auxiliares, verdaderos "chaperones" moleculares, para que una proteína pueda plegarse correctamente en el atestado interior de una célula viva. El contexto juega aquí un papel fundamental, y es por eso que los algoritmos de predicción estructural se elaboran trabajosamente a partir de unas pocas reglas generales.

En un plano de mayor complejidad, se han identificado varios cientos de moléculas que intervienen en la transmisión de mensajes destinados a producir un universo de respuestas en los sistemas biológicos. La naturaleza de estos mensajes es muy imperfectamente conocido, pero aún en los organismos con una estrategia evolutiva más simple, como las bacterias, procesos tales como esporulación, diferenciación, distintos tropismos, adquisición de capacidades nutricionales, de resistencia, etc., son mediados por estas *semiomoléculas*. En los organismos pluricelulares, otras señales y códigos determinan el desenvolvimiento del programa de desarrollo, el ciclo vital, la longevidad y el plan corporal. Contra todas las expectativas del mecanicismo biológico, los estudios más minuciosos parecen excluir la existencia de morfogenes. Los genes individuales solo determinan cualidades. Esto es, existen genes que definen si los ojos serán azules o pardos, o si se distribuirán siguiendo una simetría axial o radial, pero no existe un gen que codifique por *un ojo*. La existencia de éste y otros órganos está condicionada por el intercambio de información entre millones de moléculas a través de miles de células. El proceso es de una sutileza y complejidad exquisitas, y se encuentra al borde del caos determinista. Del mismo modo operan millones de neuronas para almacenar, en forma altamente codificada, la materia prima de los datos sensoriales, y para generar la imposibilidad termodinámica del pensamiento abstracto.

Por último, los organismos y poblaciones intercambian entre sí una multitud de señales (electromagnéticas, químicas y sensoriales) que a su vez condicionan comportamientos, atracciones, repulsiones, etc., hasta llegar a la complejidad de la comunicación animal y humana, y al universo de información que recorre los ecosistemas.

La enumeración anterior intenta ilustrar la variedad de los mensajes y códigos que determinan las propiedades de los sistemas biológicos. Aunque la importancia de la información en Biología es reconocida en forma universal, la mayoría de los estudios se ha limitado a los aspectos mecánicos del fenómeno. Todas estas señales y códigos presentan analogías formales, que son semióticas y no moleculares, y que deberían estudiarse en un contexto semiótico. De hecho, la utilización consciente de interpretaciones semióticas en Biología ya ha sido ensayada con notables resultados, proporcionando la clave para comprender uno de los procesos biológicos más complejos y fascinantes: la generación del repertorio inmune.

Un caso ejemplar. La gramática generativa del sistema inmune

En este caso el problema es el siguiente: cualquier sustancia extraña que ingresa al organismo genera una respuesta inmune; entre otras cosas, una o varias proteínas -los anticuerpos- que reaccionan *específicamente* con el compuesto incorporado o antígeno. Cómo es posible ésto? Durante algún tiempo se supuso que los linfocitos productores de anticuerpos habían acumulado a lo largo de la evolución suficientes versiones distintas de estas proteínas como para reaccionar con cualquier cosa que existiera sobre la Tierra. Sin embargo, los químicos dieron pronto por tierra con estas expectativas, al sintetizar miles de compuestos nuevos - algunos muy complejos y sin ninguna semejanza estructural con productos naturales-, los cuales fueron capaces de desencadenar respuestas inmunes totalmente normales. En 1957, Mac Farlane Burnet introdujo la noción de que cada linfocito es capaz de producir un solo tipo de anticuerpo, específico para un único antígeno. En el hombre, este *dictum* establecería un límite superior de 10^{12} linfocitos/anticuerpos para el diccionario inmunológico; un número ciertamente enorme -diez veces mayor, por ejemplo, al del total de neuronas del sistema nervioso-, pero no ilimitado. Puesto que el repertorio inmune es aparentemente completo -es decir, capaz de reconocer un número infinito de eventuales antígenos-, se deduce que en la formación del mismo interviene un proceso generativo que multiplica la potencialidad del material codificado genéticamente.

El problema es formalmente análogo al aprendizaje de una lengua. El castellano, por ejemplo, tiene unos cien mil vocablos, pero con ellos puede construirse un número potencialmente ilimitado de oraciones gramaticalmente correctas -significativas o no-, que son inteligibles para cualquier persona aunque jamás las haya escuchado antes. En los años setenta, Niels Jerne hizo buen uso de esta analogía, examinando el funcionamiento del sistema inmune con los recursos de la gramática generativa de Noah Chomsky (1984), un lingüista de la escuela estructuralista. La teoría de Jerne permitió interpretar muchas propiedades del sistema inmune, incluyendo su carácter a la vez finito e ilimitado -exactamente como el lenguaje humano. Los aspectos mecánicos de este proceso fueron descritos por César Milstein -Milstein y Jerne compartieron el Premio Nobel de Biología y Medicina en 1984-, y la teoría abrió posibilidades de investigación en campos de la Inmunología inexplorados hasta entonces (Jerne 1985, Milstein 1985). Se pudo establecer por primera vez una clara distinción conceptual entre idiotipo y alotipo, se exploraron algunas consecuencias teóricas inesperadas -como la predicción de que la mayor parte de los anticuerpos existentes son antiidiotípicos-, y se introdujo la noción de recombinación somática.

En consecuencia, la gramática generativa de Jerne -o Teoría de las Redes Idiotípicas, como también se la conoce- constituye un caso testigo en el que la aplicación de conceptos semióticos permitió comprender uno de los problemas más exasperantes de la Biología contemporánea. Eco (1988) la ha definido como la mayor aventura interdisciplinaria de la segunda mitad del siglo XX.

Apología de la interdisciplinaredad

Uno de los aspectos más interesantes de la Teoría de Jerne es que no puede ser reducida a términos moleculares. Es decir, la teoría hace abundante uso de elementos mecánicos y moleculares -de hecho, no podría haberse elaborado siquiera sin un conocimiento detallado de la estructura de la molécula de anticuerpo-, pero el aspecto central de la gramática generativa es irreductible.

Esta noción puede extenderse a los sistemas biológicos en general. Además de sus aspectos estructurales y de las leyes que los relacionan, es preciso conocer qué clase de información atesoran; cuál es el algoritmo que hace que sean y además, que sean lo que son. Cualquier doctrina que se limite a los aspectos mecanicistas dará necesariamente una versión sesgada, mutilada del fenómeno, equivalente a tratar de entender como funciona un

programa de computación estudiando únicamente el *hardware*. Por más que podamos acceder a los circuitos y *chips* y conozcamos todos los procesos mecánicos y electromagnéticos que tienen lugar en la máquina, seremos incapaces de interpretar aún el programa más simple -un procesador de textos, por ejemplo- si no aprendemos el algoritmo de operación del mismo. Este algoritmo está escrito según una lógica precisa, natural pero no reducible, que determina la naturaleza de las operaciones y su secuencia. Las leyes físicas que rigen el funcionamiento de la computadora pueden dar indicios sobre la emisión y propagación de la información contenida, pero no de su *significado*.

La descripción de un sistema biológico en términos semióticos exige comprender tanto los componentes formales como los históricos -esto es, el algoritmo y su origen, dos cuestiones íntimamente vinculadas. Discutir en profundidad acerca del aspecto que podrían adoptar el o los algoritmos semióticos excede con mucho los límites de este ensayo, pero toda la información reunida hasta el momento indica que muchos de ellos presentan las características del *caos determinista*. Gran parte de la información biológica se origina a partir de sistemas dinámicos muy alejados del equilibrio, formados por elementos interactuantes e interdependientes. Este conjunto de interacciones, signos y señales adopta con frecuencia *comportamientos no lineales*, resultando en un desarrollo de los sistemas que es característicamente irregular, individual, a menudo impredecible y altamente creativo. La gramática generativa del sistema inmune es un buen ejemplo de ello.

La cuestión del origen del algoritmo constituye un desafío especial, ya que tiene que ver con su finalidad aparente. En el ejemplo de la computadora, el algoritmo es redactado por un programador inteligente, a fin de realizar operaciones específicas y con una finalidad definida de antemano: procesamiento de textos, ajuste de curvas, etc. Del mismo modo, los seres vivos modelan sus sistemas de señales de acuerdo a imperativos excluyentes. Esto no implica caer en un "finalismo", inaceptable como recurso explicativo en ciencia, sino incorporar el elemento histórico en la génesis y evolución de los algoritmos biológicos. Del mismo modo que las estructuras que los emiten, propagan e interpretan, estos códigos y mensajes han sido trabajosamente modelados a lo largo de la historia natural de la especie.

La afirmación anterior contiene una aparente paradoja, ya que es generalmente admitido que solo los elementos heredables evolucionan, esto es, el *hardware*. Sin embargo, algoritmo y estructura son facetas indisolubles del mismo sistema. Estructuras más perfeccionadas permitirán atesorar mensajes más complejos y eficientes, generados continuamente de modo caótico, optimizando así las oportunidades del sistema para concretar el imperativo biológico por excelencia: dejar descendencia. El problema es una vez

más análogo al de la generación del lenguaje. Parece un milagro que los niños aprendan con facilidad el idioma del ambiente donde han nacido. La doctrina estructural del lenguaje, de la cual Chomsky constituye un aporte integral, argumenta que el fenómeno solo es explicable si admitimos la existencia de elementos universales vinculados a esta competencia en todo cerebro humano (Chomsky 1984). Estas estructuras innatas, formalmente análogas a las categorías kantianas, han sido fijadas evolutivamente a lo largo de la historia natural de la especie (Szathmáry y Maynard Smith 1995). Así, tanto la Biosemiótica como la Antroposemiótica de los seres vivos son determinadas históricamente por la evolución natural, el gran programador del *software* de la vida.

El componente histórico ha sido eliminado de la mayor parte de la Física y de buena parte de la Bioquímica con el objeto de facilitar el análisis. Sin embargo, una comprensión integral en el nivel de organización de la vida, con sus características únicas -autoreplicación, morfogénesis, diferenciación, diversidad-, exige un esfuerzo integrativo además de analítico. La descripción de los fenómenos biológicos requiere explicaciones que llamaría *compositivas* -a falta de un adjetivo mejor- que integren los distintos componentes que determinan la naturaleza del ser vivo: estructura, historia, semiótica. Estos elementos deben incorporarse en una teoría sintética, complementarios entre sí, y a la vez irreductibles.

Conclusiones y perspectivas

La frase de Popper que encabeza este artículo ha sido elegida porque refleja, en mi opinión, un ejemplo extremo de antimecanicismo que no conduce a propuestas superadoras. En términos generales, las doctrinas alternativas han hecho contribuciones importantes para poner de manifiesto la imposibilidad de construir una teoría biológica de base puramente mecanicista, pero no han logrado en cambio generar programas de investigación superadores respecto al método molecular. Su mayor virtud ha sido demostrar que la relación entre organismo y molécula (o entre organismo y mecanismo) es extremadamente compleja.

En este ensayo, se propone la aplicación sistemática de conceptos y métodos semióticos a la interpretación del funcionamiento de los seres vivos. El término Biosemiótica fue acuñado hace años y ha sido utilizado en una variedad de contextos. A su vez, la información constituye un tema central en la Biología contemporánea: la biología del desarrollo puede interpretarse como el estudio de la forma en que la información contenida en el genoma se traduce en estructura, mientras la biología evolutiva como la manera en que dicha

información llegó ahí en primer término (Szathmáry y Maynard Smith 1995). En otros campos, como el estudio de los tropismos, funcionamiento nervioso, percepción y respuesta a estímulos, etc., la importancia de la comunicación es asimismo evidente. La diferencia con la presente propuesta es que aquí no se plantea *únicamente* la resolución de cuestiones semióticas propias de los sistemas biológicos, sino que se propone el valor fundamental de la Biosemiótica como instrumento integrador en todos los niveles de la Biología, desde la manera en que la información genética codificada en el ADN determina, en un proceso lineal y esencialmente predecible, la estructura y función *de los sistemas aislados*, hasta el modo en que la red de señales dentro y entre organismos conduce a las manifestaciones no lineales, impredecibles y caóticas que son la propiedad distintiva de los seres vivos. La interpretación de éstos mediante eventos comunicacionales (de una manera que trasciende y a la vez incluye a la Biología Molecular), permite definir a un organismo mediante un número adecuado de interacciones semióticas, mediadas por estructuras determinadas evolutivamente.

Se ha puesto énfasis en la aplicación de métodos semióticos a nivel molecular, porque en otros niveles de la Biología, la importancia de la información resulta más evidente, mientras que a nivel molecular la mayor parte de los eventos comunicacionales se describen solamente en sus componentes mecánicos. Se ha ilustrado este punto mediante una breve descripción de la Teoría de Redes Idiotípicas. Existen muchos otros ejemplos. Aún a nivel de secuencias de aminoácidos o nucleótidos, el estudio de los mismos como mensajes -utilizando incluso recursos muy simples, tales como contenido y complejidad de información-, ofrece nuevas perspectivas para la investigación de problemas específicos. En este sentido, vale la pena mencionar recientes trabajos de Kiho y colaboradores (1996 y referencias incluidas), quienes aplicaron métodos lingüísticos al estudio de las secuencias de proteínas. Los resultados son bastante asombrosos, ya que permiten predecir sitios funcionales en proteínas partiendo de condiciones *ab initio*, es decir sin necesidad de otros conocimientos adicionales, como tests de homología o definición de secuencias consenso.

No se ha discutido aquí el comportamiento de los agentes involucrados en la transmisión de información ni la semántica de los mensajes. Las moléculas y órganos sensores se comportan básicamente como transductores, capaces de convertir patrones de energía o materia recibida como *señales*, que deben ser interpretadas de acuerdo a un *código* para convertirse en datos y, eventualmente, generar respuestas. En general, los estímulos y las señales pueden describirse en términos mecánicos (gradientes de energía, concentración, etc.), pero el estudio de los códigos no puede hacerse por medio de mecanismos y su

estructura es irreductible. En consecuencia, una teoría capaz de describir el funcionamiento de los seres vivos debe incorporar estos elementos, junto a los moleculares e históricos, de una manera no aditiva o suplementaria, sino sintética. La estructura formal de este cuerpo de abstracciones es desconocida por el momento. El objetivo de el presente trabajo es proponer estrategias en este sentido.

Por último, queda en pie la pregunta de si la Biosemiótica es solamente una herramienta interpretativa, o las propiedades semióticas de los sistemas biológicos reflejan "estructuras profundas de la realidad" (Gregory 1980), comparables a las leyes de la Física. Es prematuro, en mi opinión, hacer consideraciones definitivas respecto a este último punto. Sin embargo, su valor instrumental es innegable, y puede ayudar a resolver esta cuestión en el futuro. Las propiedades semióticas no son exclusivas de los seres vivos, pero ningún otro nivel de organización de la materia manifiesta tan profunda e intensamente esta característica. *Ser vivo es una propiedad sistémica* y por ello, la Biología es, en sí misma y en todos sus aspectos, *Semiótica Natural*.

BIBLIOGRAFIA

- Bleecken, S.: 1990, 'Welches sind die existenziellen Grundlagen lebender Systeme?', *Naturwissenschaften* 77, 277.
- Chomsky, N.: 1984, *Current Issues in Linguistic Theory*, La Haya, Mouton.
- Eco, U.: 1976, *A Theory of Semiotics*, Indiana, University Press.
- Eco, U.: 1988, 'On Semiotics and Immunology', in E.E. Sercarz, F. Celada, N.A. Mitchison, T. Tada, (eds.): *The Semiotics of Cellular Communication*, Berlin, Springer, p. 3.
- Elsasser, W.: 1975, *The Chief Abstractions of Biology*, N. York, American Elsevier.
- Gregory, R.: 1980, 'Thought and Brain', in P. Medawar, J.H. Shelley (eds.): *Structure in Science and Art*, Amsterdam, Excerpta Medica, p. 14.
- Holliday, R.: 1988, 'Successes and Limitations of Molecular', *Biology. J. Theor. Biol.* 132, 253.
- Jacob, F.: 1976, *The Logic of Life*, N. York, Vintage Books.
- Jerne, N.K.: 1985, 'The Generative Grammar of the Immune System', *EMBOJ.* 4, 847.
- Kiho, Y., Katori, K., Oshima, K., Iwai, T., Okada, Y.: 1996, 'Functional Word in a Protein. V. Comparative Linguistics', *Proc. Japan Acad. Sci.* 72, 191.

- Köhler, W.: 1971, *Die Aufgabe der Gestaltpsychologie*, Berlin, W. de Gruyter.
- Levins, R., Lewontin, R.: 1985, *The Dialectical Biologist*, Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Milstein, C.: 1985, 'From the Structures of Antibodies to the Diversification of the Immune Response', *EMBO J.* 4, 1083.
- Nordenskiöld, E.: 1946, *The History of Biology*, N. York, Tudor Publ. Co.
- Oparin, A.: 1978, *El Origen y la Evolución de la Vida*, Buenos Aires, Ediciones Curie.
- Peirce, C.S.: 1934, *Collected Papers*. Vol. 5, p. 302, Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Popper, K.R.: 1974, 'Scientific Reduction and Essential Incompleteness of All Science', in F. Ayala, T. Dobzhansky (eds.): *Studies in the Philosophy of Biology*, Londres, MacMillan, p. 259.
- Szathmáry, E., Maynard Smith, J.: 1995, 'The major evolutionary transitions', *Nature* 374, 227.
- Thorpe, W.H.: 1974, 'Reductionism in Biology', in F. Ayala, T. Dobzhansky (eds.): *Studies in the Philosophy of Biology*, Londres, MacMillan, p. 109.
- von Bertalanffy, L.: 1960, *Problems of Life*, N. York, Harpers and Row.

Néstor Carrillo, bioquímico (1979), Doctor (Ph.D., 1984), Profesor Asociado de Biología Molecular, Investigador Clase A, todos por la Universidad Nacional de Rosario. Investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Becario de la Guggenheim Foundation (Estados Unidos), 1996-1997. Ha publicado trabajos en revistas y libros de difusión internacional y participado en Congresos argentinos e internacionales de Bioquímica, Biofísica, Fisiología, Biología, Epistemología, Biotecnología y Genética.