

MODELOS TEÓRICOS DE LA BIOLOGÍA

Marcelino Cereijido y María del Refugio García Villegas

Centro de Investigación y Estudios Avanzados
Instituto Politécnico Nacional

Las concepciones mitológicas generadas para explicar la vida han sido, probablemente, los modelos teóricos más ancestrales de la humanidad y son aún sustentadas por una amplia mayoría de nuestros coetáneos. Pero no es exagerado afirmar que también las observaciones "laicas" sobre los sistemas biológicos (no así las interpretaciones) arrancan desde los amaneceres de la historia (cómo se cultiva el arroz, qué extractos vegetales tienen poderes curativos, en qué momento del año regresan las grullas). La "laicidad" de las explicaciones biológicas cobra vigor a partir de los griegos, se incrementa notablemente en el Renacimiento (los anatomistas, los fisiólogos, los taxónomos), pero es a partir del siglo XVIII y más activamente en el XIX cuando se hacen esfuerzos sistemáticos por postular modelos explicativos que no invoquen factores místicos del tipo que manejan las religiones, el animismo y el vitalismo, y que no se restrinjan a fenómenos o sistemas biológicos aislados (óptica de la visión, circulación de la sangre), sino a la totalidad de la vida.

¿Por qué el siglo XVIII? ¿Cómo se concebía el mundo en aquel entonces? En ese momento, el mundo se consideraba como una especie de reloj maravillosamente grande que conserva una estructura perpetua y que sólo se limita a funcionar cíclicamente. Se trataba de un orden jerárquico y estático, en equilibrio, sin procesos netos, en el que por lo tanto no se sospechaba que algo pudiera cambiar de nivel. Los nobles habían nacido nobles y seguirían siendo nobles, estaba en la naturaleza de

los plebeyos ser plebeyos, y los animales habían sido creados como tales y de las mismas especies que hoy deambulan por la tierra.

¿Qué sucedió hacia fines del siglo XVIII y durante el XIX para cambiar aquella visión del mundo? ¿Cómo repercutió ese cambio en la concepción del mundo biológico? Enumeraremos sucintamente algunos de los hechos:

1) En aquel momento la biología ordenó y clasificó a los diversos organismos, despreocupándose por el momento de los mecanismos responsables de esa diversidad. Pero, curiosamente, el orden taxonómico que propuso concordaría con el mecanismo responsable del ordenamiento (la evolución basada en la selección natural) que sería propuesto recién en el siglo siguiente.

2) El desarrollo de los estudios históricos mostró que el mapa de los imperios, las ropas, los medios de transporte, las armas, los instrumentos musicales, habían ido cambiando a lo largo de los siglos: el mundo no estaba en equilibrio, había una flecha temporal. También mostró que no se debe a la naturaleza de los nobles ser nobles, así como tampoco se debe a la naturaleza de las manzanas el caer hacia la tierra, sino que hay causas y procesos que provocan y dan cuenta de esos cambios. El estudio de la realidad pasa a adoptar entonces la forma de búsqueda de cadenas causales.

3) La geología, tras estudiar la lentitud con que crecen los depósitos marinos, llegó a la conclusión de que para explicar los mantos del planeta se ne-

cesita de un tiempo enormemente mayor que los cuatro o cinco mil años que entonces se le atribuían al mundo, cifra a la que se llegaba sumando las generaciones transcurridas según la Biblia a partir de Adán y Eva.

4) La paleontología cayó en la cuenta de que los restos de esos animales raros, monstruosos, que se encuentran en los estratos más viejos al horadar pozos y excavar minas en busca de agua y minerales, o en las fallas de terrenos en que los estratos aparecen a la vista, no se encuentran en los nuevos y, viceversa, no se halla en esos mantos antiguos resto alguno de los animales actuales. También advirtió que entre aquellos "monstruos" antiguos y los animales modernos no hay una solución de continuidad; por el contrario, hay una especie de proceso gradual de transformación de unos en otros, y se desencadenó entonces una búsqueda de parentescos y "eslabones perdidos".

La realidad pasó a ser considerada como algo en continuo cambio, que requiere modelos explicativos dinámicos, en los que, claro está, la variable central es el tiempo. El siglo XIX es el momento en el que los filósofos (v. gr. Hegel), los geólogos (v. gr. Hutton, Lyell), los historiadores (v. gr. Marx), los psiquiatras (v. gr. Freud), los termodinamistas (v. gr. Clausius) y por supuesto los biólogos (v. gr. Buffon, Lamarck, Russell, Darwin) proponen modelos en los que lo actual deja de ser visto como algo equilibrado y permanente, y pasa a ser considerado como el producto de algún proceso iniciado en el pasado y que aún continúa. Los modelos explicativos que se fueron adoptando desde entonces han ido cambiando, reflejando transformaciones en su marco conceptual.

Desde nuestro punto de vista la primera etapa estuvo basada, con todo, en el criterio de equilibrio, la segunda en el de estado estacionario, la tercera en el de crisis y la cuarta en el de caos.

Equilibrio

En el momento en que la biología renuncia a invocar todo factor o mecanismo divino, no acepta que los animales que hoy vemos hayan sido creados como tales, y propone procesos físicos y químicos y de selección natural para explicar el origen de la vida. Se desarrolla paralelamente la termodinámica y se llega entonces a la conclusión de que si lo biológico se rige por las leyes físicas, sus modelos habrán de atenerse a las leyes de la termodinámica. Estas leyes indican que es sumamente improbable (en la práctica es imposible) que el choque de moléculas en equilibrio haya formado primero células simples (procariotes) luego más complejas (eucariotes), luego organismos multicelulares y que, como productos finales de ese proceso espontáneo, sin intervención divina, se hayan generado cerebros con millones y millones de neuronas que se autoorganizan en circuitos de increíble complejidad y que se repiten con asombrosa regularidad en los individuos de una misma especie.

A pesar de esas objeciones, la mayoría de los biólogos ensaya con compuestos y condiciones que imitan los que se sospecha hubo en la tierra prebiológica, tratando de producir en el laboratorio las moléculas imprescindibles para ensamblar los primeros organismos.

Sin embargo, por los años sesenta de este siglo, el biofísico Harold Morowitz señalaría: a) que un organismo contiene una enorme cantidad de energía en los enlaces químicos de sus moléculas; b) que gracias a las enzimas, esa enorme cantidad de energía es procesada a baja temperatura (en el organismo humano a 36-37 °C), de lo contrario serían tan lentas que no resultarían compatibles con la vida; c) que si se toma una bacteria, se la calienta a, digamos, diez mil grados, con lo que se rompen todos los enlaces entre las

moléculas y se obtiene un cúmulo de átomos sueltos, uno podría llevarlos a contener de nuevo el mismo nivel de energía que tenían cuando formaban la bacteria; d) que incluso los diversos tipos de enlaces químicos que se llegarían a formar al calentar, mostrarían una distribución distinta de la que se observa en los sistemas biológicos.

Independientemente de cómo se hayan originado y evolucionado, cabe preguntarse si acaso los organismos biológicos están hoy en equilibrio. La respuesta vuelve a ser negativa: en el equilibrio, cualquier alejamiento espontáneo de la homogeneidad se convierte en un potencial, en una fuerza que impulsa un proceso cuyo resultado es, justamente, restablecer el equilibrio. Para que resulte claro: si elevamos el nivel del agua en una punta de la alberca, provocaremos un flujo hidráulico que la vuelve a nivelar; si la calentamos en un extremo el calor difundirá y la temperatura se homogeneizará.

Por el contrario, los organismos biológicos: a) tienen una distribución iónica y molecular heterogénea y altamente improbable, que no es la que cabría esperar de un proceso difusivo. Por ejemplo las células tienen mucho más potasio que el medio que las rodea; con el sodio sucede lo contrario; el yodo se acumula casi exclusivamente en la tiroides; cada célula tiene enzimas que son exclusivamente intracelulares. b) Mientras la estructura molecular de una palanca, de un engranaje, de un pistón es irrelevante, la estructura de los sistemas biológicos es compleja y fundamental a todos los niveles, desde el anatómico (brazo, cabeza) hasta el subcelular (mitocondrias, microtúbulos) y molecular (hemoglobina, DNA), y además c) para mantener esas estructuras biológicas es necesario realizar un incesante trabajo de reparación, de lo contrario se descomponen como resultado de los enormes desequilibrios y los cambios -ahora sí espontáneos- que tienen lugar en cuan-

to el organismo muere. d) Por último, los organismos funcionan, es decir, experimentan procesos que no tienden a detenerse: las células metabolizan, las glándulas segregan, el corazón late, el animal camina, vuela, procrea.

En suma: el enfoque de equilibrio no es satisfactorio para dar cuenta ni de las estructuras ni de los procesos vitales.

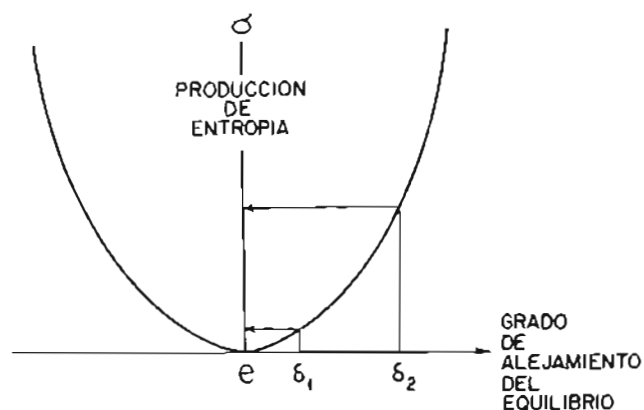
Estados estacionarios

El estado estacionario se parece al de equilibrio en que los parámetros tienden a mantenerse constantes, pero se diferencia en que esa constancia se consigue gracias a un incesante gasto de energía. Por ejemplo, si una jarra tiene un litro de agua en equilibrio, su volumen no varía; pero si por el contrario tiene un orificio que le ocasiona una pérdida progresiva, debemos hacer el trabajo de reponerla al mismo ritmo para que el volumen no cambie. Este es, pues, un equilibrio, no un estado estacionario. Otro ejemplo sería



Bertrand Russell (1872-1970).

FIGURA 1



Producción de entropía (σ) en función del grado de alejamiento (δ) del equilibrio (e).

el de dos amigos, uno desde una escalera fija y el otro desde una mecánica, que al encontrarse deciden detenerse un momento para conversar. Al primero le bastará con quedarse quieto ("equilibrio"), pero el segundo deberá saltar de escalón en escalón para permanecer en el nivel de su amigo (estado estacionario). Es por eso que el estado estacionario se llama a veces "equilibrio dinámico".

Desde el punto de vista termodinámico, en el equilibrio la cantidad de entropía llega al máximo y una vez ahí, deja de producirse en forma neta. La producción de entropía en función del tiempo σ vale cero en el equilibrio. Por el contrario, como en el estado estacionario hay que hacer trabajos para que el sistema no cambie, hay una continua producción de entropía (σ es distinta de cero) (véase la figura 1). Cuanto mayor es el grado de alejamiento del estado de equilibrio (δ), tanto más intenso será el trabajo necesario para mantener el sistema en estado estacionario, y tanto mayor será entonces la producción de entropía por unidad de tiempo (σ).

Al alejar un sistema del equilibrio (supongamos que intentamos mantener una barra de hierro caliente en un extremo y fría en el opuesto) aparecerán gradientes que desencadenarán procesos (en este caso un flujo de ca-

lor) y, por supuesto, se disipará energía y la producción de entropía (σ) aumentará. Se advierte fácilmente que la dirección de esos flujos es tal, que siempre restablecen el equilibrio.

Clásicamente cada flujo depende de su fuerza. Por ejemplo, el potencial eléctrico genera la fuerza impulsora que da cuenta del movimiento de los electrones, el gradiente de temperatura provoca un flujo de calor, el de concentración un flujo de materia, el de presión hidrostática un flujo de agua, etcétera. Sin embargo, la existencia de fenómenos termoelectrónicos atestigua que un gradiente de temperatura puede dar lugar a una corriente eléctrica y viceversa, que un potencial eléctrico puede originar un flujo de calor. De modo que en un sistema el flujo de calor tendrá por lo menos dos componentes: uno debido a su fuerza (el gradiente de temperatura) que se denomina "fuerza conjugada", y otro debido a la diferencia de potencial eléctrico. En principio, todos los flujos presentes en el sistema pueden estar influenciados por todas las fuerzas presentes.

Con todo, el estado estacionario pareció ser un mejor esquema conceptual para entender los procesos biológicos que el esquema basado en el equilibrio. Tomemos por ejemplo la homeostasis: si hidratamos a un animal orinará más, si le privamos de agua orinará menos, si intentamos subirle la glucemia administrándole glucosa ésta se convertirá en glucógeno y se depositará en las células y si, por el contrario, lo privamos de glucosa, el glucógeno de las células se convertirá en glucosa y se vertirá a la sangre. Lo mismo sucederá con otros parámetros fisiológicos: el organismo desencadena procesos que parecen oponerse al cambio que le queremos provocar, de manera que mantiene su constancia. En una palabra: la homeostasis se consigue gracias a la acción de una multitud de procesos fisiológicos que trabajan (gastan energía, aumentan la entropía) para que

nada cambie; la tentación de equiparar el estado de un organismo a un estado estacionario fue muy grande.

Sin embargo, estos enfoques también fueron abandonados por dos razones principales:

a) Las tendencias a volver al sistema a su estado estable, que mencionamos con referencia a la figura 1, sólo se pueden asegurar para alejamientos "no muy grandes" del equilibrio (para δ pequeños). Cuando en cambio δ es grande, se pueden desencadenar crisis (véase figura 2) en las que el sistema no sólo no retorna a su estado estable, sino que su mismísima estructura puede colapsarse. Pensemos por ejemplo en un hilo de cobre en el que si ponemos una diferencia (alejamiento de la homogeneidad y del equilibrio) de potencial de un volt entre sus extremos fluirá una corriente de, digamos, un amper; con dos volts fluirán dos amperes; con tres volts, tres amperes, etcétera; pero no podemos predecir qué sucedería si aplicamos cien mil voltios. Seguramente el hilo se fundirá y la ley de Ohm que regía el proceso dejará de tener aplicabilidad y sentido. Análogamente, la homeostasis biológica tiene límites: un gato calentado a 100 °C o desecado, no podrá recuperar su temperatura ni su hidratación normal.

Cabe mencionar que el grado de alejamiento del equilibrio que permiten los distintos sistemas es variable, y que los sistemas que, debido a la no-linealidad entre flujos y fuerzas, son más propensos a sufrir una crisis a poco de alejarse del equilibrio, son los químicos. Ahora bien, como se recordará, los sistemas biológicos son justamente sistemas químicos y están muy alejados de sus equilibrios.

b) Los enfoques de estados estacionarios sirven, a lo sumo, para explicar el modo en el que un sistema biológico mantiene su estructura y su forma de funcionar actuales, pero por lo mismo son inadecuados para explicar cómo se gesta un nuevo organismo y cómo se

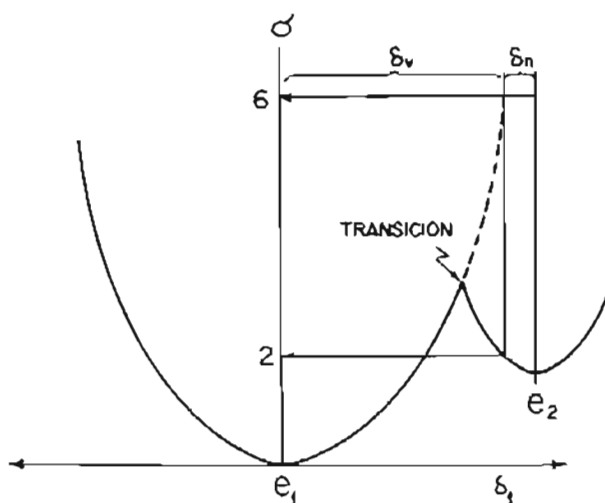
lleva a cabo la evolución.

Desequilibrios y crisis

Cuando un sistema se aleja demasiado del equilibrio sufre crisis, tras las cuales las leyes que relacionan los flujos y las fuerzas dejan de tener validez y el conocimiento que expresaban es reemplazado por la ignorancia (véase la figura 2). Los sistemas biológicos incluyen reacciones químicas no lineales de por sí muy propensas a caer en crisis a poco de alejarse del equilibrio, y por otro lado se sitúan frecuentemente muy lejos de éste, por eso los procesos vitales no siempre se pueden describir mediante la extrapolación de las leyes que rigen en el equilibrio.

Esta es también la razón de que los sistemas biológicos caigan en crisis drásticas en las que cambian su estructura y su manera de funcionar. Pensemos por ejemplo en la gestación de un ser humano: el funcionar del huevo lo

FIGURA 2



Cuando el grado de alejamiento del equilibrio e_1 es muy grande, el sistema deja de obedecer las leyes que, de otra forma, lo seguirían regiendo (línea segmentada), sufre una crisis y hace una transición estructural y funcional, más allá de la cual ya no generará en su seno fuerzas que lo regresen al equilibrio e_1 , sino al e_2 . Adviértase que cuando el sistema se encuentra, por ejemplo, en el punto δ_i , está muy alejado (δ_v) de su viejo equilibrio, y estaría produciendo seis unidades arbitrarias de entropía por unidad de tiempo. En cambio, por haber hecho la transición, en ese mismo punto tiene un grado de alejamiento menor (δ_n) del nuevo equilibrio e_2 , y sólo está produciendo dos unidades.

convierte en mórula, luego en blástula, feto, niño, adolescente, adulto, anciano. Cada uno de estos estadios tiene una estructura tan característica, que un forense puede determinar con bastante exactitud la edad de un cadáver. Este ejemplo nos permite ver otros aspectos de las crisis:

1) Tras funcionar y llegar a una "crisis", una mórula no se desintegra en el "caos", sino que hace una transición a otra estructura distinta (blástula), que también tiene una estructura ordenada y que también funcionará hasta llegar a otra crisis (gástrula) y así sucesivamente.

2) Por eso un feto no es una mórula gigante, sino otra estructura, con otras propiedades, y un adulto no es como un bebé sólo que de mayor tamaño. Juzgado como huevo fecundado, la estructura del adulto "no tiene sentido".

3) En primera aproximación, resulta paradójico y hasta mágico que lejos del equilibrio, cuando una estructura (mecánica, arquitectónica, biológica, social) se hace más inestable, más a punto de descalabrarse ... y se descalabra, surge como por encanto una nueva estructura con un altísimo nivel de organización, que requiere una enorme cantidad de información, sobre todo si tenemos en cuenta que desde los estudios de Shannon se sabe que la información "cuesta" energía libre.

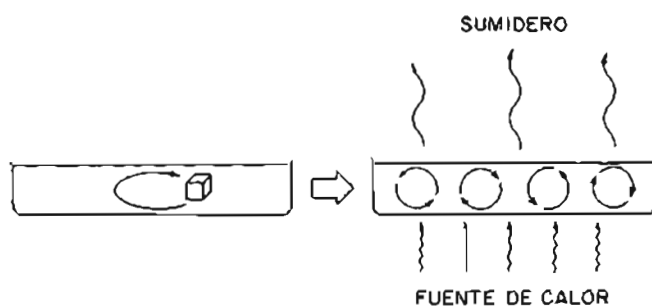
Nadie nos creería si le dijéramos que, por azar, las moléculas más veloces del aire de una habitación coincidieron en penetrar en un globo desinflado que había sobre la mesa y lo inflaron, o que las moléculas de una mesa coincidieron en la dirección en que se agitaban térmicamente y la elevaron a dos metros del piso; estos fenómenos comportan un alejamiento tan grande del equilibrio que su pro-

babilidad es despreciable: para todo fin sensato son imposibles.

Sin embargo, quien riegue su jardín con una manguera verá que al incrementar el desequilibrio (abriendo más la llave para que la presión del agua suba muy por encima de la atmosférica) el chorro se ordena en abanico, o se parte en dos sub-chorros, o forma un cono, u otro arreglo que sería impensable cerca del equilibrio.

Un caso particularmente interesante para entender lo biológico, es el de los sistemas sometidos a una situación en la que no se pueden equilibrar jamás. Por ejemplo, el sistema que se ilustra en la figura 3 está intercalado entre una fuente y un sumidero. Si su desequilibrio con la fuente disminuye, su desequilibrio con el medio aumenta y viceversa. En un sistema intercalado similar al de la figura 3, Bénard analizó el flujo de calor desde la fuente al sumidero, que al llegar a cierta temperatura da lugar a la formación de celdas en las que las moléculas de agua (del orden de 10^{22} por cada mililitro de agua) giran coordinadamente. Este ordenamiento se producirá con toda regularidad cada vez que se repitan las condiciones. Es decir, lo que era un improbable-imposible cerca del equilibrio, tiene probabilidad 1 (es una ley) cuando el sistema se aleja de él.

FIGURA 3



Izquierda: un recipiente contiene agua en equilibrio. La posibilidad de que las moléculas de agua dentro de un volumen como el representado por el cubo, tengan fluctuaciones térmicas y se pongan a girar en conjunto, coordinadamente, es demasiado remota (imposible). Derecha: cuando se intercala el mismo recipiente (sistema intermedio) entre una fuente que entrega calor y un sumidero que lo absorbe y disipa, se puede llegar a una situación en la que las moléculas de agua se ponen a rotar como se indica.

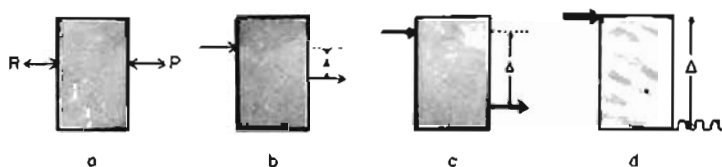
La figura 2 también indica que, si el proceso con equilibrio en e_1 no hubiera hecho una transición, estaría muy alejada de dicho equilibrio (δ_1 sería muy grande) y estaría produciendo seis unidades de entropía (curva segmentada). En cambio, por haberla hecho y tender ahora al equilibrio e_2 , está más cerca de este equilibrio y produciendo sólo dos unidades de entropía.

Advirtamos que tras el equilibrio e_2 puede haber otras transiciones y otros equilibrios. Justamente, como mencionábamos más arriba, un organismo biológico sufre una serie de transiciones desde su etapa de huevo fecundado hasta la de anciano senil, que normalmente se recorren en forma regular. Sería grotesco que un bebé tuviera un sistema de homeostasis tan perfecto, que compensara y corrigiera cualquier variación y le evitara llegar a sucesivas crisis, pues quedaría como un bebé perpetuo. Por el contrario, los organismos parecen estar programados para tener una sucesión regular de crisis.

En un sistema químico el desequilibrio estaría representado por el gradiente de concentración entre reactivos y productos (véase la figura 4). Éste puede ser tan grande que dé lugar a fenómenos con cierto orden, ya sea dentro del reactor (por ejemplo, se ordena en capas de diferente concentración de productos intermedios) o del flujo (por ejemplo, en lugar de ser continuo, puede sufrir oscilaciones periódicas). Los grandes creadores en esta área fueron Belusov, Zabolinsky, Morowitz, y Prigogine y su escuela.

Las contribuciones de Morowitz fueron particularmente interesantes. Primero demostró que el flujo estacionario (de energía o materia) a través de un sistema intermedio, le provoca cambios cíclicos en su interior que lo

FIGURA 4



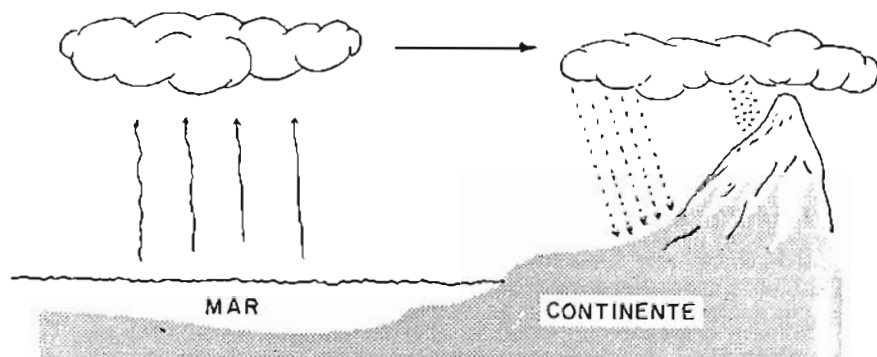
a) La entrada de reactivos químicos (R) y la salida de productos (P) está en equilibrio y no hay un balance neto. b) Si se aplica un desequilibrio (D) se genera un flujo neto de reactivos y productos. c) Si el desequilibrio es mayor, el flujo se incrementará. d) Si el desequilibrio es muy grande, podrían llegarse a observar ordenamientos de las sustancias dentro del sistema (ordenamientos en franjas superpuestas, en espirales, etcétera), periodicidades en la producción, y otros fenómenos estructurados.

hacen más complejo. El caso de Bénard que mencionamos más arriba es un ejemplo de esta situación, pero Morowitz la ilustró con la dinámica del agua de la corteza terrestre (véase la figura 5): si sólo hubiera suministro de energía solar el agua acabaría por evaporarse totalmente; si sólo hubiera disipación de calor hacia el espacio extraterrestre se congelaría; en cambio, el hecho de que haya un flujo equilibrado, hace que haya agua líquida (lluvias, ríos, lagos, mares), en estado de vapor (nubes) y en estado sólido (nieve, hielo).

Morowitz también demostró que esto es válido para sistemas químicos. El flujo de energía solar hace que los electrones de ciertas moléculas se exciten y tengan mayor reactividad, participen en enlaces con otras y formen compuestos que, con la absorción de más energía solar podrán también activarse y formar compuestos más complejos, o bien descomponerse y decaer. El flujo de energía provoca así una dinámica de la biosfera en la que se forman y desintegran moléculas de una variedad muy grande.

Estos ciclos son acoplables: los pobladores asentados en la ladera de una montaña (véase la figura 5) podrían usar el potencial del agua de un río para generar electricidad, y vender así otro tipo de desequilibrio: el que existe entre las dos terminales de un enchufe (110-220 volts). Aprovechando la tendencia homogeneizante de la

FIGURA 5



La biosfera constituye un sistema intermedio, similar al de la derecha de la Figura 3, en el que la fuente de calor es el Sol y el espacio exterior es el sumidero. El flujo de calor a través del sistema evapora el agua, produce nubes, lluvias, nevadas y ríos que regresan el agua al mar. Vemos nuevamente que el flujo estacionario de energía a través del sistema, le provoca ciclos materiales que lo estructuran en una organización mucho más compleja que la que tendría si el agua sólo recibiera calor solar y se evaporara totalmente, o si sólo se disipara calor hacia el espacio exterior y se congelara.

naturaleza, los moradores permitirían que el exceso de electrones en una terminal llegue a la otra terminal, pero pasando a través de circuitos de tostadoras, focos, tornos, secadores de cabello, computadoras. La organización del poblado podría alcanzar así niveles de complejidad muy altos, "pagados" energéticamente por el Sol a través del flujo de agua en el río y de la planta de electricidad.

Pero no podemos concluir de aquí que toda transición se hace hacia una estructura mejor, que funcione más eficientemente. "Cambio es una cosa, progreso es otra. Cambio es inevitable, progreso está sujeto a controversias" afirmaba Bertrand Russell. La transición puede ser hecha hacia una estructura más apta, pero lo más común es que se haga hacia lo patológico o hacia la muerte. Justamente, la evolución es la historia de las especies que pudieron hacer una serie de transiciones útiles y ventajosas antes de que todos sus individuos llegaran a la muerte; pero es bueno recordar que alrededor de cada veintiséis millones de años hay una gran extinción de especies, que el 99% de las especies que han habitado el planeta se han extinguido, y que todos los organismos aún vivientes habrán de morir.

Caos

En lo que va del texto hemos tocado sin detenemos dos puntos que ahora se tornan importantes: 1) la cantidad de variables de los sistemas biológicos y la complejidad de los acoples entre los procesos que son tan grandes, que si bien los biólogos los aislamos para su estudio (el potencial de acción de un nervio,

el metabolismo de la glucosa, la secreción de aldosterona, etcétera), comprobamos que cuando están integrados al sistema biológico real, no siempre se comportan como lo habían hecho aisladamente; en suma, que los sistemas biológicos son formalmente complejos. 2) Sin embargo, su dinámica caótica no es una situación totalmente desprovista de orden, sino que a lo sumo escapa al concepto o tipo de orden que imperaba antes de la crisis. Pero, ¿cómo entender el caos? ¿cómo encontrar el orden de algo que escapa a nuestro concepto de orden? ¿Cómo encontrar las leyes que rigen en ese aparente galimatías racional?

Aún no podemos responder, pero es claro que el análisis de los sistemas dinámicos que no alcanzan un equilibrio "clásico" de quietud, ni tienen procesos que sigan una dinámica lineal, sino que enfrentan bifurcaciones y tienen estructuras fractales, constituye un nuevo enfoque, del cual nos limitaremos a dar algunos ejemplos biológicos.

Si registramos con mucha precisión algún parámetro biológico, digamos la glucemia, veremos que se trata de un nivel aceptablemente estable, pero que, así y todo, no es constante, sino que presenta pequeñas variaciones más o

menos irregulares. Esas irregularidades no se deben a errores de la determinación, sino a que, en cada momento, el nivel de glucosa en sangre refleja la función de una multitud de mecanismos fisiológicos que lo modifican: la absorción intestinal, la captación por las células de todo el organismo, su conversión en glucógeno en hígado y músculos, la conversión inversa, la función pancreática, la tiroidea, la suprarrenal, la variación, la variación de los niveles de sodio fuera y dentro de la célula que modifican la operación de los acarreadores sodio-glucosa, etcétera. Cada mecanismo de control necesita de cierto desvío para "despertarse" y entrar en función: es necesario que el nivel de glucosa en sangre se eleve un poco para que el páncreas se active y la descienda, por el contrario, la activación de la suprarrenal está condicionada a que la glucemia baje un poco. Esta es, desde luego, una situación inherente a todos los parámetros controlados por circuitos de retroalimentación.

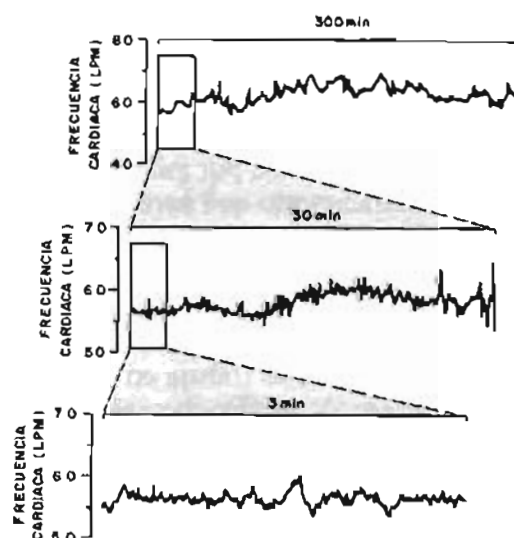
Análogamente, si registramos otros parámetros (el nivel de sodio en plasma, el electroencefalograma, el electrocardiograma, el potencial eléctrico de las membranas celulares, la temperatura) constataremos que ellos tampoco se aquietan en un estado estacionario sereno, sino que tienen irregularidades parecidas a las que acabamos de mencionar.

Cuando se trata no ya de niveles estables, sino del trabajo cíclico de algún órgano, por ejemplo del corazón y más concretamente su ritmo de latidos, observaremos, de nuevo, que existe cierta variabilidad. Ari L. Goldberger hizo un análisis espectral de estas variaciones, y observó que fluctúan de una manera compleja aun en sujetos normales en reposo (véase la figura 6); que la forma de esta fluctuación resulta similar a lo largo de varias escalas de tiempo, fenómeno que es típico de los sistemas caóticos. Más aún, si Gold-

berger hacia esas mismas determinaciones en sujetos con ciertas afecciones cardíacas, recogía trazados más regulares (véase la figura 7b) y si la afección era muy grave, *premortem* digamos, el trazado resultaba aún más "ordenado", en el sentido de que no presentaba la variabilidad de los sujetos normales (véase la figura 7c). En una palabra, la variabilidad del trazado no se debe a "ruido", sino a una situación fisiológica. El cambio conceptual es aquí ostensible: hasta hace poco tiempo, con el concepto de salud basado en el equilibrio, uno hubiera dicho que la persona cuya actividad cardíaca es como la que se muestra en la figura 7c gozaba de mejor salud que la del registro 7a.

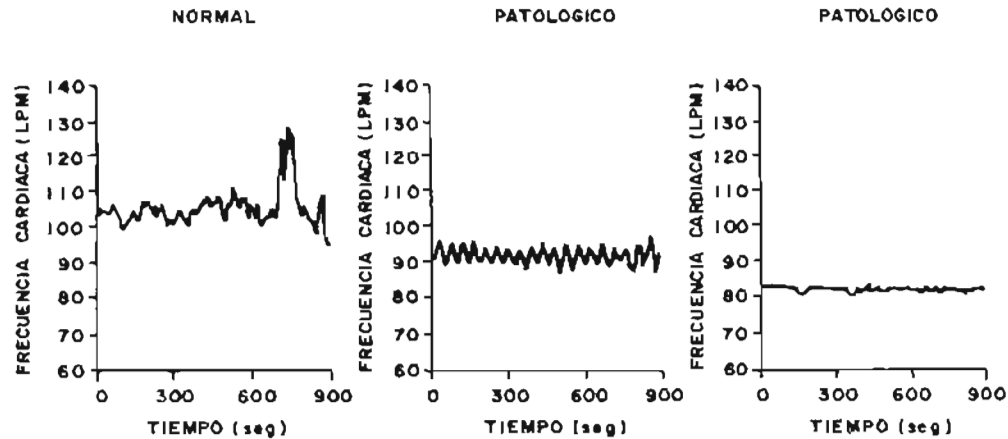
El aspecto caótico de los procesos biológicos no se limita a los niveles fisiológicos ni a las funciones cíclicas que acabamos de mencionar, sino que se observa también en la propagación de las epidemias, en la progenie de los camarones a lo largo de sucesivas ge-

FIGURA 6



Oscilaciones de la frecuencia cardíaca (en latidos por minuto) a lo largo del tiempo. Advuértase que las formas de estas oscilaciones se repiten a varias escalas temporales. Así, cuando un segmento de estos trazados (rectángulo en el registro superior) se amplifica diez veces (centro) o un segmento de esta amplificación se vuelve a amplificar otras diez veces (registro inferior) se observa el mismo tipo de variaciones (simplificado de Goldberger, 1991).

FIGURA 7



De izquierda a derecha. Registros de la frecuencia cardíaca (latidos por minuto) en un sujeto normal, en un cardíopata y en un cardíopata grave (simplificado de Goldberger, 1991).

neraciones, en la distribución de árboles en los bosques y en cuanto sistema se lo ha buscado.

Todo hace pensar que estamos entrando a una nueva etapa, adoptando un nuevo paradigma de lo biológico pero, por ser tan actual, resulta prematuro hacer generalizaciones.

Los marcos conceptuales y la labor de investigación

Einstein ha dicho que la propiedad del universo que más le maravillaba era su comprensibilidad, en el sentido de que cualquier problema, por más enigmático y contradictorio que parezca podrá explicarse tarde o temprano. Explicita o tácitamente todos los investigadores comparten el mismo punto de vista o alientan las mismas esperanzas. Esto hace que cada uno trabaje en su campo y se encoja de hombros al oír hablar de posibles incongruencias y violaciones de los postulados de la ciencia, sobre la base de que "ya se aclarará". Para ilustrar esta forma de operar de los investigadores, nos referiremos a dos ejemplos muy conocidos:

1. En el siglo pasado Du Bois Raymond descubrió que una membrana biológica disecada y montada a manera de diafragma entre dos cámaras que contienen la misma solución, establece

entre ambas una diferencia de potencial eléctrico. Hacia principios de este siglo Galeotti postuló que ello es debido a que la membrana es más permeable al sodio de afuera hacia adentro que en el sentido inverso. Su hipótesis fue atacada porque parecía en flagrante violación de los principios de la termodinámica. Y aquí viene el parteaguas al que nos queremos referir: por un lado se llegó a pensar que eso se debe a que los sistemas biológicos no obedecen a las leyes de la física, posición que, ni más ni menos, equivale a aceptar el "principio vital" descartado hace más de un siglo; pero por otro lado, la mayoría de los biólogos, en total ignorancia de las dificultades teóricas que mencionamos, siguieron trabajando y encontrando enzimas, ordenamientos de membranas, y acoples entre flujos y fuerzas que finalmente aclararon la contradicción. El "ya se aclarará" quedó justificado.

2. Se fueron encontrando propiedades moleculares (ejemplo, la capacidad catalítica del RNA) y reacciones (la mutación espontánea de RNA artificial) a través de las cuales pudieran haberse formado las primeras moléculas de RNA, de proteínas y de DNA con ayuda de arcillas y metales catalizadores, y hoy se tiene un panorama bastante aceptable de cómo pudo ha-

berse originado la vida en el planeta.

La mayoría de los científicos que lograron estos conocimientos ni se enteró de las dificultades conceptuales. Más aún, las disquisiciones teóricas y los esfuerzos por resolver los dilemas, que se hicieron paralelamente a esos avances experimentales, fueron apareciendo en revistas que no son siquiera consultadas por la mayoría de investigadores. Peor aún, muchos de los investigadores que trabajan en estos temas consideran que los planteos teóricos y el temor de que lo biológico resultara no ser explicable por lo físico, no son más que bizantinismos puesto que, al fin y al cabo, el trabajo de bioquímicos, biofísicos, fisiólogos y paleontólogos fue brindando una explicación detallada de cómo sucedieron las cosas: "se aclararon por sí solos".

De manera que cuando al presentar estos temas nos referimos a etapas conceptuales basadas en el equilibrio, el estado estacionario, las crisis y el caos, no estamos describiendo momentos históricos en los que la comunidad de biólogos fue cambiando sus marcos teóricos ni su forma de trabajar. Ni siquiera creemos que se haya percataado de las transiciones de una etapa a otra. Menos aún queremos implicar que, aquellos que se mantuvieron al corriente de los cambios de planteo, modificaran apreciablemente su forma de operar. Es como si la investigación científica se manejara dentro de un marco teórico eminentemente práctico, restringido a los planteos necesarios para encontrar más "hechos" dentro de un tema limitado e independiente del cuerpo de la ciencia, y que, en cambio, la sistematización del conocimiento sólo le concerniera al epistemólogo que trata de ordenar los planteos *a posteriori*.

Lecturas recomendadas

Blanck-Cereijido, F. y Cereijido, M., "La Vida, el Tiempo y la Muerte", Fondo de Cul-

tura Económica, México, 1988.

Cereijido, M., "Orden, Equilibrio y Desequilibrio", Nueva Imagen, México, 1978.

Cereijido, M., "Enfoques Termodinámicos de la Vida", en *Segundo Coloquio del Departamento de Matemáticas del CINVESTAV* (J.J. Rivaud, compilador), Morelos, 1981, pp. 27-41.

Cereijido, M., "Termodinámica y Origen de la Vida", en *Correspondencia: Homenaje a Oparin*. (Artís, Casanueva y Chávez, compiladores), Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1983, pp. 91-105.

Cereijido, M., Ponce, A. and González Mariscal, L., "Tight Junctions and apical/basolateral polarity", *Journal of Membrane Biology*, 1989, vol. 110, pp. 1-9.

Cereijido, M. and Rotunno, C.A., "Introduction to the Study of Biological Membranes", Gordon & Breach, London, 1970.

Eigen, M., "Molecular Self-organization and the Early Stages of Evolution", *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1971, vol. 4, p. 148.

Glass, L. and Mackey, M.C., "From Clocks to Chaos: the rhythms of life", Princeton University Press, 1988.

Goldberger, A.L., "Is the normal heart-beat chaotic or homeostatic?", *News in Physiological Sciences*, 1991, vol. 6, pp. 87-91.

Morowitz, H., "Energy Flow in Biology: biological organization as a problem in Thermal Physics", Academic Press, New York, 1968.

Prigogine, I., "Thermodynamics of Irreversible Processes", Charles C. Thomas Press, Springfield, 1955.

Prigogine, I. and Nicolis, G., "Biological Order, Structure and Instabilities", *Quarterly Reviews of Biophysics*, 1971, vol. 4, p. 107.