

## Tiempos vivos

Juan Tomé

En este planeta hay vivos. Queremos decir con esto que nos reconocemos (y reconocemos a otros con propiedades similares) como seres que “nacen, crecen, se desarrollan y mueren”, según la definición escolar más clásica de ser vivo. Aunque es difícil atrapar la vida en una definición, todos los intentos modernos de conseguirlo recogen tres ideas: una, que los vivos son capaces de metabolismo (conjunto de reacciones bioquímicas de las que obtienen la energía y las sustancias que precisan para su mantenimiento, desarrollo y función); dos, que se reproducen (que tienen mecanismos de replicación de individuos mediante la información contenida en sus genomas); y tres, que participan de la evolución darwiniana (que forman parte de un conjunto evolutivo que refleja tensión permanente entre permanencia y cambio por interacción con el medio).

Esas tres ideas forman parte de los intentos de definición de los vivos desde el punto de vista de la Biología. Hay otros aspectos de la definición de vivo, los que tienen que ver con la Física, que está menos trillados. Desde este punto de vista, los vivos somos sistemas abiertos no térmicamente aislados en un estado de desequilibrio estacionario que se mantiene aprovechando desequilibrios disponibles en el entorno para mantener sus funciones biológicas (metabólicas, reproductivas y de interacción evolutiva con el medio físico y biológico que les rodea). Pero esta frase es un concentrado de lenguaje científico que debe ser explicada palabra por palabra.

Lo primero es que los vivos somos un sistema, es decir un conjunto de componentes distinguible de sus alrededores, con límites reconocibles. Una célula es un sistema separado del medio por su membrana. Nosotros somos un sistema separado del medio por la piel. Estamos separados del medio pero no estamos aislados de él. Los sistemas aislados tienen que ser cerrados (nada puede entrar o salir de ellos) y energéticamente aislados (no puede haber intercambio energético de ningún tipo). Una nevera portátil pretende ser un sistema aislado, es decir, cerrado y térmicamente aislado a la vez. El habitáculo de un coche (supuesto hermético) aparcado al sol es un sistema cerrado pero recibe energía solar que lo calienta, así que sería un sistema cerrado no energéticamente aislado. Un termo eléctrico pretende ser térmicamente aislado pero en él entra energía eléctrica y circula agua a su través, así que es abierto y no energéticamente aislado. Como los seres vivos intercambiamos materia (comemos, excretamos, lloramos, sudamos, etc.) y energía (recibimos fotones, ondas sonoras, realizamos calor) con el entorno, somos sistemas abiertos y no energéticamente aislados.

Lo segundo es que los seres vivos estamos en un estado de desequilibrio estacionario. Es de desequilibrio porque el estado no se mantendrá si el sistema se aísla (se desconecta) del entorno. Es estacionario porque es estable si el sistema sigue en interacción con el entorno. Como las palabras desequilibrio y estacionario parecen ser antitéticas (pasa algo parecido con equilibrio inestable), conviene parar un poco en esto. Las situaciones de equilibrio han sido más estudiadas por las ciencias clásicas (la Física, la Química) que las de desequilibrio. Las ideas de equilibrio mecánico (estable, inestable o indiferente) son las más sencillas y fáciles de

ejemplificar. Estamos acostumbrados a ver que los estados de equilibrio se mantienen sin acciones externas, que se mantendrían aún si el sistema se aislara del entorno. También estamos acostumbrados a ver que los estados de desequilibrio evolucionan hasta alcanzar uno de equilibrio en un proceso sin pausas, imparable mientras los estados sucesivos sean de desequilibrio.

Más raros, más difíciles de ejemplificar son los sistemas en desequilibrio estacionario. Es decir, sistemas que no permanecerían en ese estado si se aislaran (en desequilibrio) pero que presentan un estado mantenido (estacionario). El estado de una pelota de pin pon que se mantiene en la corriente de aire que un secador de pelo lanza hacia arriba es un ejemplo útil. La pelota en la corriente de aire mantiene un estado oscilante entre ciertos límites que no se sobrepasan porque existe un mecanismo de autocontrol: cuando se separa del centro de la corriente, la interacción con ella lo devuelve hacia el centro. El estado no es estático, como el de los equilibrios mecánicos, sino dinámico, pero es estacionario porque se mantiene. Es evidente que el estado es dependiente del flujo de aire, que si se desenchufa el secador, aislándolo del entorno, la pelota cae. Al desenchufar, se deja en evidencia su estado de desequilibrio y la evolución (caída) hacia un estado de equilibrio.

El estado de desequilibrio estacionario de la pelota de pin pon se mantiene porque hay un flujo de aire que se origina en un desequilibrio de presiones (un *gradiente* de presiones) que se produce con el giro de las aspas del secador. Los estados de desequilibrio estacionario se mantienen así en general: un desequilibrio externo, un *gradiente*, origina un flujo al que el sistema se acomoda y en el que se apoya para mantener ese estado. El estado de los vivos es de ese tipo: desequilibrio estacionario. Para mantener su estado, los vivos necesitan aportes constantes de materia y energía, que transforman y devuelven al medio. Esos flujos de materia y energía son los equivalentes al flujo de aire que sostiene a la pelota. Lo mismo que el flujo de aire está producido por un desequilibrio de presiones distinto al desequilibrio de la pelota, los flujos de materia y energía que sostienen al vivo se deben a desequilibrios externos al vivo. Por último, lo mismo que en caso de la pelota, el vivo tiene sistemas de control que mantienen su estado dentro de ciertos límites (temperatura, presiones de fluidos, concentraciones de sustancias, etc.). El vivo se mantiene como tal mientras los desequilibrios externos persistan y le permitan disponer de luz, de humedad, de materiales y nutrientes en el medio, y no haya fallos funcionales internos que impidan su aprovechamiento. En caso contrario el equilibrio estacionario no se puede mantener y el vivo muere. La muerte es un estado de equilibrio estable no cambiante (el cadáver se podría aislar y mantener, por ejemplo por criogenización), que equivale al de la pelota que cae al suelo cuando se desenchufa el secador.

En resumen, desde el punto de vista de la física, somos sistemas abiertos (respiramos, bebemos, comemos, excretamos) no energéticamente aislados (nos calentamos, nos refrescamos, recibimos fotones) en desequilibrio estacionario (*homeostasis*) que se mantiene aprovechando gradientes disponibles en el entorno (luz, humedad, alimentos, oxígeno). Nuestro desequilibrio se sostiene en desequilibrios externos. Conviene ahora analizar cómo se mantienen éstos.

Consideremos el caso de nuestra alimentación. Un gajo de naranja contiene un cúmulo de sustancias químicas en desequilibrio con el entorno. Un naranjo las sintetizó y las reunió, en un

conjunto y en unas concentraciones que no se encuentran en ninguna parte sin intervención del naranjo. Separado del naranjo que lo sostuvo, el conjunto se descompone, pierde sus propiedades. Una naranja es un sistema en desequilibrio, cuya evolución espontánea (como la de la pelota sin chorro de aire) es un decaimiento hacia equilibrios estables. Sintetizar y acumular sustancias químicas en la naranja es similar a acumular nieve en el Pirineo. Tener nieve en el Pirineo (y un entorno de menores alturas) es disponer de un sistema en desequilibrio cuya evolución espontánea es formar flujos de agua que avanzan hacia situaciones de equilibrio estable (hasta el Mediterráneo, o el Atlántico, según la vertiente por donde el agua resbale) pasando por algunas estables intermedias (embalses). El conjunto de aguas en desequilibrio (y los flujos que origina), puede aprovecharse para poner en marcha distintos procesos (todos los de ecosistemas de río, hidroeléctricos, abastecimiento, agricultura, etc.) Tener nieve en los Pirineos y un entorno de menor altura es disponer de un gradiente gravitatorio que origina muchas transformaciones. Con el mismo lenguaje, tener una naranja y un entorno de menor concentración (de las sustancias “raras” que el naranjo acumuló en la naranja) es disponer de gradientes químicos que pueden poner en marcha muchos procesos. Por ejemplo, procesos metabólicos de quién la come.

Consideremos ahora el caso de nuestra respiración. Consiste, esencialmente, en quemar lentamente sustancias para aprovechar la energía que se libera en el proceso. Como toda combustión, la respiración requiere oxígeno, que capturamos del aire que nos rodea mediante los pulmones. Una quinta parte (21% ) del aire es oxígeno. Eso es mucho, y más teniendo en cuenta que el oxígeno es muy reactivo (por eso es tan útil para nosotros) y que en el entorno hay muchas sustancias que reaccionarían fácilmente con él. La atmósfera rica en oxígeno que aprovechamos para respirar está en desequilibrio. Tener una atmósfera con esa concentración de oxígeno en un entorno reactivo es disponer de un gradiente químico que pone en marcha muchos procesos. Por ejemplo, hace posible nuestra respiración.

Pero, y esta es la pregunta clave, ¿cómo se sube nieve a los Pirineos, se empaquetan sustancias en una naranja o se acumula oxígeno en la atmósfera?, ¿cómo se embalsa agua que pueda ser desembalsada y mueva turbinas? o ¿cómo se concentran sustancias que muevan el metabolismo de los vivos? En resumen ¿cómo se genera el gradiente gravitatorio hidráulico y los gradientes químicos que permiten nuestra alimentación y nuestra respiración? Para encontrar la respuesta hay que seguir la pista a los procesos que los generan. El gradiente hidráulico se produce por los procesos de evaporación, transporte y precipitación del ciclo del agua en el planeta. Los gradientes químicos de nuestra alimentación y nuestra respiración se producen por procesos que, directa o indirectamente, tiene origen en la fotosíntesis . Sabemos que es la energía solar que llega a la superficie terrestre la que aporta la energía necesaria para la evaporación y la fotosíntesis, que la energía solar es necesaria para tener nieve en los Pirineos, naranjas en Valencia y oxígeno en el aire. La energía solar que nos llega es parte del inmenso torrente de energía que el Sol vierte al exterior, la parte que el planeta intercepta. Bien. Pero ¿por qué existe ese flujo de energía desde el Sol hacia su exterior. Primero, porque en el interior del Sol se producen reacciones nucleares de fusión que liberan enormes cantidades de energía que se transporta hacia su superficie y la calienta. Segundo, porque la temperatura del medio, del entorno del Sol (o de cualquier otra estrella), la “temperatura del universo”, es mucho menor que la de la superficie del Sol. El flujo de energía se produce desde la superficie caliente del Sol hacia medio frío del universo. Es esa diferencia de temperaturas,

ese gradiente térmico, el que hace posible el flujo de energía solar que pone en marcha los procesos del ciclo del agua que suben nieve a los Pirineos y los de la fotosíntesis que terminan con naranjas en Valencia y oxígeno en la atmósfera. Los gradientes de aquí son resultados de procesos cuyo origen es el gradiente térmico entre el Sol y su entorno astronómico. Los desequilibrios de aquí tienen origen en el desequilibrio termodinámico del universo, en el hecho de que en el universo existen estrellas calientes en un medio frío.

El planeta Tierra está en un estado de desequilibrio estacionario sostenido por el flujo de energía solar debido al gradiente térmico entre el Sol y su entorno. Pero además, el flujo de energía en la ecosfera pone en marcha procesos (ciclo del agua, fotosíntesis por ejemplo) que originan nuevos gradientes, que ponen en marcha nuevos procesos, ramificándose así el flujo inicial de energía solar en una intrincada red de flujos secundarios, de procesos interrelacionados y de subsistemas en desequilibrio estacionario: la biosfera y todos sus vivos. El último proceso de toda esta red es la emisión de energía del planeta hacia su entorno astronómico, que es posible, como en el caso del Sol, porque la temperatura del planeta es mayor que la del entorno. Este último gradiente térmico genera el flujo saliente de energía necesario para que el estado estacionario del planeta se mantenga, para que, después de circular por todos los canalículos de la biosfera, se desagüe al universo tanta energía como la que el planeta interceptó.

Podríamos seguir el rastro de cualquier gradiente en la biosfera y nos llevará al desequilibrio termodinámico del universo. Hemos llegado hasta él analizando desequilibrios que nos sostienen como vivos. Pero no hacía falta un camino tan largo, porque ese desequilibrio se hace patente cada noche estrellada. La contemplación del cielo oscuro salpicado de estrellas brillantes es la contemplación de un sistema frío y oscuro (el universo) que contiene objetos calientes brillantes (las estrellas). La noche estrellada evidencia que en el universo hay objetos calientes en un entorno frío y que, por tanto, fluirá energía desde las estrellas hacia su entorno. Ya hemos visto que ese flujo de energía mantiene todos los desequilibrios de la biosfera. Así que la observación de noches estrelladas es consistente con nuestra existencia como vivos.

Y ¿desde cuándo existen éstos desequilibrios? ¿cuánto tiempo el universo lleva el universo manteniendo desequilibrios necesarios para la vida? Pues veamos. La atmósfera permanece en el estado de desequilibrio actual (una concentración de oxígeno en torno al 21 %), necesario para nuestra respiración, desde hace unos 500 millones de años. Los primeros indicios de fotosíntesis en el planeta son de hace 3500 millones de años. La historia evolutiva de la vida en este planeta dura unos 4000 millones de años, casi un tercio de la historia del universo. La existencia de cada uno de nosotros supone la existencia de gradientes astrofísicos mantenidos durante un tercio de la historia del universo. Los tiempos vivos en este planeta llevan durando mucho. Y los desequilibrios en el universo que han hecho posible la vida aquí llevan durando más. El sistema Sol-Tierra y sus desequilibrios asociados existen desde hace 5000 millones de años. La observación astrofísica más antigua de objetos luminosos sobre fondo oscuro es la de unas galaxias de 13300 millones de años de antigüedad.

De una época un poquito más antigua son las observaciones de la CBR, radiación cósmica de fondo, una radiación (un tipo de "luz", fotones) que llena el universo y que, por tanto, se

detecta apuntando los receptores hacia cualquier punto. Esa radiación es el resto fósil de un estado muy primitivo del universo. La CBR es la misma radiación que llenaba el universo en aquel momento tan primitivo. Antes de aquel momento la interacción entre fotones y materia impedía la formación de átomos. La temperatura era muy alta y el golpeteo de fotones podía romper cualquier átomo que se formara. Pero la temperatura fue bajando, los fotones fueron perdiendo energía y llegó el momento CBR: el golpeteo de los fotones ya no rompía los átomos que se formaban. A partir de entonces, materia y radiación evolucionaron independientemente, se dice que se desacoplaron. La materia fue formando las estructuras que conocemos y la radiación que llenaba el universo en aquel momento, simplemente, se fue enfriando hasta su temperatura actual,  $\approx 3K$  ( $-270^{\circ}C$ ). Sus propiedades se conservaron, el enfriamiento las fosilizó o, si se quiere, las congeló. Aquella radiación sigue llenando el universo (por eso se recibe de todas partes) y su estudio actual nos dice cómo era el universo en aquel momento tan primitivo. Pues bien, las propiedades de la CBR delatan que el estado del que proviene era de equilibrio termodinámico. Se fecha ese estado en 300000 años después del Big bang, hace unos 13700 millones de años. Ese es el momento a partir del que el universo se desequilibra termodinámica, el principio de los tiempos vivos tal como los conocemos actualmente.

Una última pregunta puede ser pertinente: ¿por qué se desequilibró el universo? La respuesta es porque estaba en expansión, y eso lo enfrió rápidamente, de forma que la materia pudo formar los “grumos” que dieron lugar a estrellas calientes mientras que la radiación de fondo se enfriaba. La expansión rompió el equilibrio termodinámico, desequilibró el universo, lo salvó de la muerte. Todo tiempo posterior fue “vivo” hasta ahora.

Tenemos la suerte de que nos ha tocado existir en tiempos vivos. Esta frase está bien pero debe quedar constancia de que es una verdad de Perogrullo, porque no podría haber sido de otra manera. Nuestras propiedades de vivos tienen que ser consistentes con las propiedades de nuestro entorno local, planetario y universal. No podríamos estar vivos en tiempos muertos. Sin embargo, acortándola un poco gana interés. Quedaría así: “Tenemos la suerte de existir”. Si así se considera, los tiempos vivos merecen su disfrute. El conocimiento de que nuestro desequilibrio de vivos está relacionado con el desequilibrio termodinámico del universo podría ayudar. Podría ser que después de leer estas páginas os sentéis con alguien al aire libre, tal vez en la terraza de algún ventorrillo, y alejados de las luces, viendo estrellas en lo oscuro, digáis a quien os acompañe “mira, tiempos vivos para el universo y para nosotros”. Y podría ser que él, o ella, según los casos, os conteste, con razón científica, algo tan emocionante como “lo supe desde que te vi”.