

# ECOLOGÍA Y CULTURA EN CANARIAS

MUSEO  
DE LA  
CIENCIA Y  
EL COSMOS



ORGANISMO  
AUTÓNOMO DE  
MUSEOS Y CENTROS



Antonio Machado, Francisco García-Talavera,  
Eustaquio Villalba, José María Fernández-Palacios,  
Arnoldo Santos, Juan José Bacallado,  
Federico Aguilera-Klink, Joaquín Araújo.



# LA VIDA EN PERSPECTIVA

Antonio Machado

Miembro de la Comisión Científica Asesora del  
Museo de la Ciencia y el Cosmos

# LA VIDA EN PERSPECTIVA

Antonio Machado

Miembro de la Comisión Científica Asesora del  
Museo de la Ciencia y el Cosmos

## ¿QUÉ ES LA VIDA?

Todos nosotros tenemos una idea más o menos precisa, o al menos intuitiva, de lo que es la vida. Pero seguramente se trata de una idea antropizada; es decir, muy sesgada hacia la escala del hombre: el tipo de organismo biológico que somos, nuestro tamaño y la escala de tiempo –decenas de años– en que transcurren nuestras propias existencias.

Para entender lo que es la vida, hay que desbaratar primero esta visión particularizada y pensar en la vida como un fenómeno cósmico, del cual conocemos al menos un caso –la vida en La Tierra– y al que atribuimos una edad de unos 3.800 millones de años. El ser vivo más pequeño conocido es una bacteria cuyo diámetro es apenas 1.000 veces el del átomo de hidrógeno, y el más grande no es la ballena azul (26 metros, 180.000 kg), sino una inmensa chopera de álamo temblón en Utah, que pesa unas 26.000 toneladas y cubre cerca de 43 hectáreas<sup>1</sup>. El hombre anda por ahí en medio, pero si consideramos las escalas físicas del Universo –entre el átomo de hidrógeno ( $0,5 \times 10^{-10}\text{m}$ ) y los 16.000 millones de años luz de sus confines–, cabe concluir que la vida se da sólo a escalas pequeñas; en realidad, diminutas. Como se verá, la vida terráquea es básicamente bacteriana y muestra un grado de miniaturización tremendo.

Esta vida que conocemos es un estado peculiar de la materia; una propiedad emergente de la física y la química que otorga individualidad a los organismos vivos y hace que funcionen como sistemas complejos adaptativos, recuperando parte de la entropía que generan en forma de información. Los organismos vivos son, pues, sistemas disipativos abiertos, autopoyéticos, mnemónicos, con capacidad para reproducirse y tendencia a expandirse en el espacio. Así, de entrada, esta definición puede resultar algo oscura, pero a lo largo del texto que sigue se concretará lo que todo esto significa, si bien es necesario introducir algunos conceptos físicos para poder abarcar la vida en toda su perspectiva.

### Sistema disipativo abierto

Los principios de la termodinámica nos enseñan que todo tiende al desorden y, en consecuencia, un orden o estructura dado sólo se puede mantener si lo atraviesa un flujo de energía. Esto ocurre en los llamados sistemas termodinámicamente abiertos descritos por el Premio Nobel belga Ilya Prigogine. Una vela es un buen ejemplo. La llama se mantiene activa pero a costa de consumir mucha energía (combustión de la cera); toma oxígeno, devuelve dióxido de carbono al aire, y disipa cantidad de calor. Los organismos vivos también intercambian materia con el exterior y aprovechan un flujo de energía para mantener o aumentar su orden interno. La energía que emplean es energía lumínica o química, de alta calidad<sup>2</sup>, disipando asimismo mucho calor. Llama y vida son sistemas disipativos abiertos y, a pesar de sus obvias diferencias –la vela no puede reproducirse ni replicarse a sí misma– la expresión popular percibe también las semejanzas que subyacen y dice que la llama está “viva”.

---

1. Datos de Jeffrey Milton, Universidad de Colorado.

2. Esto es importante, pues cuanto más baja es la calidad de la energía, mayor ha de ser el sistema que la usa para obtener un mismo resultado.



*Los álamos (Populus sp.) se expanden mediante estolones que van generando nuevos pies clónicos (mismo genoma) y permanecen conectados bajo tierra; constituyen un único organismo, que puede ocupar enormes extensiones.*

## Sistema autopoyético

A pesar de que así pudiera concluirse del ejemplo recién expuesto (vela/ vida), lo que caracteriza unívocamente a los organismos vivos no es su capacidad para replicarse o expandirse—también lo hacen algunas sustancias minerales—sino la aptitud de autoproducción y de automantenimiento. La individualidad de un organismo vivo se mantiene a base de incorporar, construir, reparar, almacenar, destruir, recomponer y eliminar sus elementos constituyentes. Los biólogos chilenos Francisco Varela y Humberto Maturana introdujeron en 1970 el término de autopoyesis para referirse a esta propiedad que es, realmente, el signo distin-

tivo de la vida. El automantenimiento y autoproducción en los sistemas químicos—lo que llamamos metabolismo— definen intrínsecamente la vida; todo ello, lógicamente, mediante consumo de energía. Según Lynn Margulis y a título de ejemplo, una célula intercambia con el medio miles de veces unas 5.000 proteínas a lo largo de su vida; nuestro cuerpo reemplaza el 98% de los átomos cada año, el epitelio intestinal se renueva cada 5 días, la piel cada 6 semanas, el hígado cada 2 meses, etc. Mientras todo esto ocurre persiste la misma entidad del individuo.

Como ejemplo contrario, sirva el caso de los virus que, aún siendo un producto de los seres vivos, no se les considera como vida. Los virus necesitan de la maquinaria de células vivas para funcionar y reproducirse, cosa que no pueden hacer por sí mismos. Los virus no son autopoyéticos, luego no son vida.

## Sistema mnemónico

El orden que muestran los seres vivos y la organización progresiva de la materia viva a lo largo de la evolución, parecen contradecir el segundo principio de la termodinámica, de que todo tiende al desorden. Cierto es que, como sistemas disipativos abiertos, los seres vivos disipan calor y generan así mucha entropía<sup>3</sup>, pero ello no resuelve la aparente paradoja de que, de hecho, se está produciendo orden a “contracorriente” del principio general.

La naturaleza tiene el aspecto dual de materia - energía, siendo ambas intercambiables (fórmula de Einstein,  $E = mc^2$ ). Por otra parte, la Física teórica nos dice que todo cambio

3. La entropía es un descriptor; una medida de la energía que no se puede recuperar a su forma original después de cualquier interacción energía -sistema material. Expresa, en cierto modo, el derecho de irreversibilidad que se reserva la Naturaleza.

de estado en la materia asociado a una disipación de energía es información. Esta información queda asociada (acumulada) a la materia, salvo que se destruya mediante calor. Así, un organismo vivo, a medida que se producen cambios en él –y ya vimos que son muchos– acumula información. Se dice que son sistemas con memoria o *mnemónicos*. La materia viva es pues memoria; es historia. Y dicha historia no sólo abarca la particular ontogénesis de un individuo dado (lo programado y las contingencias), sino que, empaquetado en los gametos que recibió de sus progenitores, se halla toda la historia evolutiva que ha permitido llegar hasta él: su filogénesis.

Basado en estos aspectos de la teoría de la información, el ecólogo español Ramón Margalef aborda la paradoja expuesta y considera a los seres vivos como sistemas que recuperan parte de la entropía generada como información. Asimismo, plantea la óptima acumulación de información –trueque de entropía por información– como un posible principio variacional en la Física.

### **Sistema complejo adaptativo**

Los seres vivos están compuestos por agua (su mayor parte) y una serie de moléculas complejas –algunas, como las proteínas, extremadamente complejas– que no se encuentran de forma natural en los sistemas no vivos. Los elementos que forman estos compuestos “orgánicos” son hidrógeno, carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo, hierro, etc., elementos que abundan en el Universo, pero en moléculas o compuestos muchos más simples. Tal concentración y alambicamiento de compuestos químicos, embutidos en orgánulos y estructuras a su vez variadas y complejas, es también una característica que permite reconocer a la materia viva. Pero lo importante, realmente, no es su composición ciertamente compleja, sino su comportamiento autopoyético –que ya vimos– y como sistema complejo adaptativo.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts se construyó un robot de seis patas articuladas gobernadas cada una por un ordenador. Cada ordenador se equipó con un generador de movimientos aleatorios, pero también se introdujo un criterio selectivo que favoreciera aquellos movimientos que produjeran un desplazamiento de todo el conjunto (se interconectaron los ordenadores con sensores de movimiento). El robot acabó caminando como un insecto: las patas delanteras y traseras de un lado se movían al unísono con la pata media del otro lado. Este es un ejemplo simple de un sistema complejo adaptativo: el robot se adaptó a caminar. Ejemplos reales son el sistema inmunitario de los mamíferos, el lenguaje hablado, el mercado económico; etc.

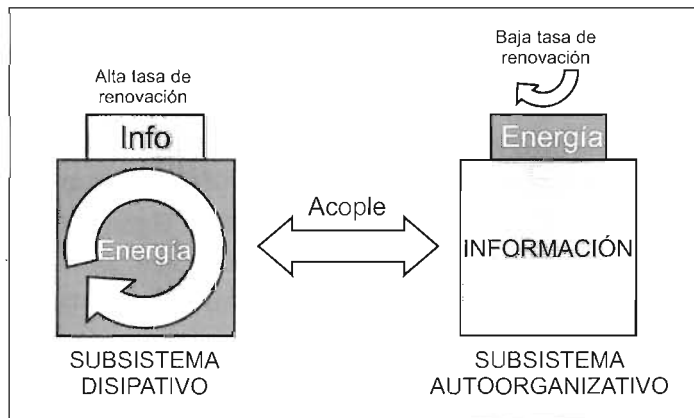
Es esencial que exista un criterio selectivo para que el sistema “aprenda” y se adapte a él. Murray Gell-Man, descubridor del quark y Premio Nobel de Física, se ha ocupado del estudio de este tipo de sistemas y concluye, que si dejamos que el tiempo corra, los sistemas complejos adaptativos tienen la propiedad de progresar de modo natural de estados caóticos desorganizados, indiferenciados e independientes hacia estados organizados, altamente diferenciados e interdependientes. Como se verá, la vida es un excelente caso de sistema comple-

jo adaptativo: las mutaciones son aleatorias e introducen el nivel de "ensayo" necesario, y el factor selectivo que la mueve, es la selección natural darwiniana. Los sistemas complejos adaptativos tienden a ser no lineales, son capaces de almacenar información y se autoorganizan. Así ocurre con la vida.

### Conjunción y acoplamiento

La llama de la vela que pusimos como ejemplo de estructura disipativa apenas avanza en autoorganización debido a las altas temperaturas que alcanza (recordemos que la temperatura destruye la información). Hay sistemas disipativos menos "energéticos", menos dinámicos, más "fríos" en definitiva, que por tanto pueden acumular más información y se autoorganizan mejor.

En la naturaleza es frecuente encontrar que sistemas más "disipativos" y sistemas más "autoorganizativos" se conjugan y actúan de forma acoplada. El primero, más dinámico (alta tasa de renovación), aporta energía para el conjunto, mientras que el segundo puede permitirse el acumular información (baja tasa de renovación). Entidades más extensas pueden contener y manejar más información, y cuanto mayor es la acumulación de información en un sistema, mejor rendimiento se saca a toda nueva entrada de información o energía<sup>4</sup>. Pensemos en nuestro propio organismo. El sistema digestivo es "más disipativo", mientras que el sistema nervioso es "más autoorganizativo". De manera intuitiva el saber popular habla de cabeza "fría" y barriga "caliente". Esta conjunción o acoplamiento de un subsistema más disipativo con otro más autoorganizativo se da a nivel intracelular o en la estructuración de los ecosistemas.



### ¿CÓMO SE LLEGÓ A LA VIDA?

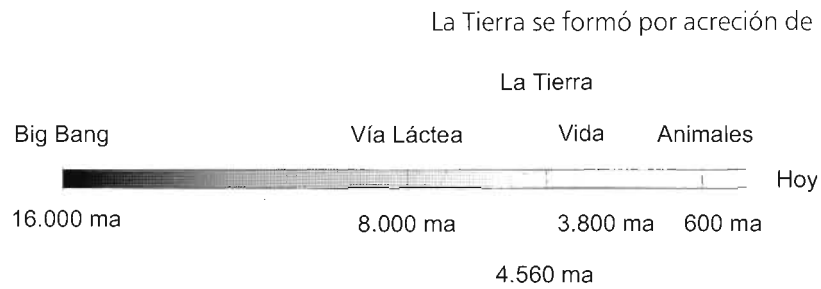
Supongamos que es cierto que el Universo se originó con el big-bang hace unos 16.000 millones de años. La materia, hipercaliente al comienzo ( $T > 10^{16} \text{ }^\circ\text{C}$ ), se estructuró desde el mismo inicio y así lo ha venido haciendo progresivamente a medida que el Universo se expande y se enfría. Los elementos químicos que conocemos se formaron en el crisol de estrellas muy calientes, que al colapsar –supernovas– expulsaron estos elementos al espacio, para luego volver

a agregarse por gravitación y dar origen a estrellas de segundo orden, y luego de tercer orden si se repite el proceso. Algunas de estas estrellas cuentan con planetas en sus proximidades<sup>5</sup>.

4. Los modernos ordenadores son un buen ejemplo. Cuanto mayor es un programa (más información) más cosas podrá hacer con unos pocos datos, en un mismo tiempo.

5. Hay unos 1.000 millones de estrellas parecidas al Sol sólo en nuestra galaxia. Por el momento se han registrado indicios de la existencia de una docena de planetas (fuera del sistema solar), y se piensa que puede tratarse de un fenómeno común.



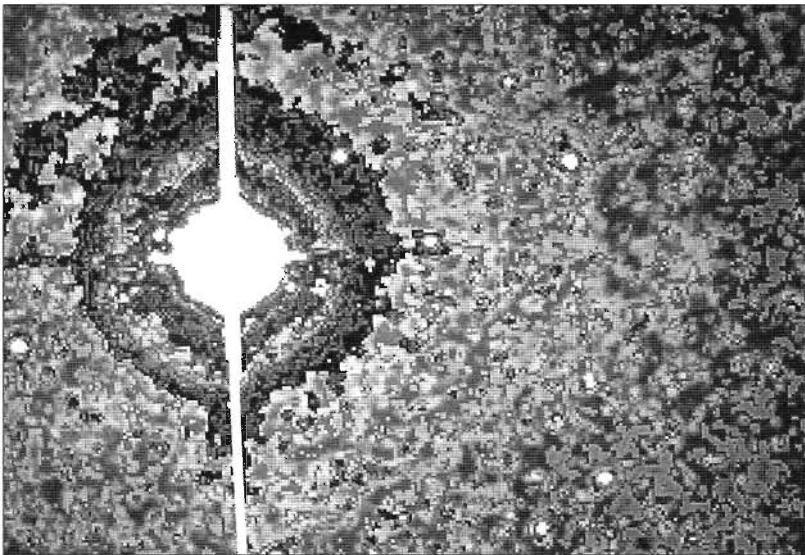


La Tierra se formó por acreción de polvo interestelar hace unos 4.560 ma (la Vía Láctea hace 8.000 ma); se encuentra a una distancia del sol, tal que permite la existencia de agua líquida en su superficie, y cuenta con suficiente masa gravitatoria para retener una atmósfera (si no, se perdería). Estas son condiciones esenciales para el desarrollo de la vida, y se puede hablar de una “ventana de habitabilidad” en el cosmos. No podemos concebir otro modelo de metabolismo que esté basado en un compuesto distinto al agua.

### Evolución química prebiótica

En sus inicios, La Tierra consolidada contaba con una superficie muy acuosa y la atmósfera estaba formada básicamente por dióxido de carbono, amoniaco, nitrógeno molecular y metano. Había continuas tormentas eléctricas y los meteoritos y demás detritus interestelar seguían arribando con frecuencia (al menos durante los primeros 800 millones de años). Estos meteoritos –sobre todo los menores– aportaron cantidades suplementarias de agua y CO<sub>2</sub> (en forma de hielo) y algunos compuestos orgánicos simples, incluidos varios hidrocarburos. En el Universo y fuera de nuestro planeta se han detectado unas 70 moléculas “orgánicas”, incluidas el alcohol etílico, amoniaco, urea, formaldehído, cianamida, etc. Todos ellos son compuestos basados en el carbono y no en el silicio, que también abunda en el Universo y cuenta asimismo con cuatro valencias.

Parece también significativo que la vida, tal como la conocemos, está estructurada



Los elementos que nos constituyen se originaron en grandes crisoles estelares. De ahí, la conocida frase de que “somos polvo de estrellas”. Supernova 1987 A. Foto Instituto de Astrofísica de Canarias.

sobre el carbono y no el silicio. Este último, aunque puede formar polímeros, establece enlaces con excesiva rigidez que impedirían la flexibilidad requerida para el metabolismo.

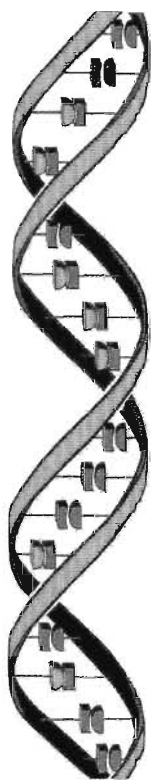
La formación espontánea de moléculas simples que ocurre en el cosmos, se vio favorecida en el tremendo reactor químico que suponía la superficie de La Tierra primigenia (calor, descargas eléctricas, radiación ultravioleta, radiación cósmica, compuestos y ¡agua!). Se piensa que en esta agitada “sopa primordial” se formaron muchas moléculas, entre ellas, las cinco bases que constituyen el código genético y los ácidos nucleicos, unos compuestos con la peculiaridad de ser capaces de replicarse debido al



sistema determinado de uniones químicas Adenina –Guanina, Citosina–Timina (Uracilo). No hay testimonio de estos procesos, aunque muchos se han logrado reproducir en laboratorio. Con todo, la sopa primordial postulada por Oparin cuenta con mucho agnóstico<sup>6</sup>.

Esta evolución química prebiótica se supone que fue simultánea con la formación del Planeta y su hidrósfera. La concatenación de las primeras “piezas” para formar cadenas de ácido ribonucleico (ARN) debió de verse favorecida por alguna estructura o fenómeno externo. Se piensa que esto pudo ocurrir sobre la superficie estabilizante de la pirita; en los géiseres o chimeneas submarinas, en la película líquida bajo hielo o en los charcos que se secaban y rehidrataban dejando una orla lineal de compuestos en sus márgenes. Cairn-Smith postula que fueron las arcillas con sus estructuras laminares las que favorecieron el proceso (en fangos y aguas someras).

Los fosfolípidos –otro de los productos espontáneos de la sopa primordial– son hidrófobos y pueden formar, por salpicadura, pequeñas vesículas de 10 a 30 micras de diámetro, suficiente para albergar en su interior algo de la sopa primordial y ARN con capacidad replicadora. Así, si las vesículas eran disgregadas en dos o más partes, podían acabar por generar en copias más o menos exactas de la vesícula original.



### EL CÓDIGO DE LA VIDA

Las moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) contienen cuatro bases (Guanina, Timina, Adenina y Citosina) que se disponen secuencialmente formando cada tres un triplete o codón, hasta un total de 64 combinaciones diferentes. Un codón indica el inicio, otro el fin de lectura y el resto se corresponden a los 20 aminoácidos que constituirán la futura proteína (varios codones repiten el mismo aminoácido). El orden de estas

bases y, en consecuencia, la cantidad y orden de los aminoácidos determinan las distintas proteínas que se han de sintetizar. Este es el Lenguaje de la vida; su código genético.

### Los primeros seres vivos

Con la formación de una membrana, se separa un pequeño sistema de su entorno, una célula, y se inicia la vida y lo que entendemos por un sistema complejo adaptativo. Aquellas combinaciones en la química interior de la vesícula que favorecían la replicación (= más de lo mismo) y el incipiente metabolismo, acababan por perpetuarse, aumentar en número y dominar el espacio. En otras palabras: eran seleccionadas.

En un principio, el ARN, además de su función replicadora, ejerció directamente funciones catalíticas. Más adelante, y a medida que se complicaba la composición intra-vesicular o intracelular, la cadena simple de ARN acabó por conjugarse en una doble cadena en disposición de hélice, el ADN, surgiendo el código genético tal como lo conocemos. El ADN determina la secuencia de aminoácidos que han de constituir las diferentes proteínas que, con su increíble diversidad y versatilidad, se ocupan de dirigir la mayor parte de los procesos vitales.

6. Jeffrey Bada, del Instituto de Oceanografía Scripps en California; considera que La Tierra primigenia estaba helada (agua y CO<sub>2</sub>) y que estas reacciones ocurrían en la película líquida bajo el hielo; el frío favorece la estabilidad de los compuestos y el hielo los protege de la radiación ultravioleta.

En la confección de las proteínas participan sólo 20 aminoácidos, que son realmente pocos en relación a los posibles. Esta característica es universal en La Tierra y la que aboga por un origen único y común de la vida conocida. No hay razón para que otras formas de vida basadas en el agua y el carbono, o incluso en el ADN, tengan que usar precisamente estos 20 aminoácidos. Esta es una contingencia en la vida terráquea, como lo es también su quiralidad<sup>7</sup>. Una contingencia es una casualidad; algo que ocurre al azar o de forma no predeterminada. La teoría del caos destaca como los sistemas no lineales son muy susceptibles a las contingencias en sus momentos iniciales. La evolución de la vida está preñada de contingencias.

Las primeras formas de vida son, pues, celulares y pequeñas. Una membrana rodeando un plasma con numerosas moléculas que realizan la autopoiesis. A estos seres vivos los llamamos bacterias y llevan en La Tierra más de 3.800 millones de años<sup>8</sup>. Dominaron el Planeta en exclusiva durante 1.800 ma y aún hoy son los principales responsables del funcionamiento global de la biosfera (reciclado de elementos biógenos).

Los microfósiles más antiguos claramente reconocibles fueron encontrados por el paleobiólogo J. William Schopf en Australia, son parecidos a cianobacterias y datan del Precámbrico, hace 3.460 ma. En esa época La Tierra giraba más rápido (días de 18 horas), el sol —más joven— tenía un brillo más difuso y sólo el 70% de su intensidad actual, y las tierras emergidas eran roca volcánica.



Los estromatolitos son complejos bacterianos en capas que van acumulando roca bajo ellos. Un paisaje parecido a este pudo existir en el Precámbrico. Estromatolitos actuales en Shark Bay, Australia.

El diminuto tamaño de las bacterias viene determinado por la necesidad de tránsito de la energía en su interior, que no está estructurado a pesar de contar con un alto nivel de orden molecular. Las primeras bacterias obtienen su energía de enlaces químicos, oxidando compuestos (fermentación) que toman del exterior, de la “sopa” primordial, que más bien debió ser un sirope dulce (rico en ribosa, glucosa, etc.).

Las bacterias autótrofas<sup>9</sup> son las que consiguieron elaborar pigmentos capaces de movilizar electrones y con ellos apropiarse del hidrógeno imprescindible para construir los compuestos hidrocarbonados a partir de compuestos férricos o azufrados (SH<sub>2</sub>) o, en el caso de la

7. Muchas moléculas orgánicas tienen isómeros levógiros y dextrógiros; sin embargo toda la bioquímica celular está organizada con moléculas levóginas. Una vez la vida arranca con un tipo de isómero, ya no cabe marcha atrás; en nuestro caso, la vida seguirá siendo “de izquierdas”, por decirlo de algún modo.

8. Stephen J. Mojzsis, de la Universidad de California (Los Ángeles) encontró algo parecido a “células” en rocas del SO de Groenlandia, con 3.860 ma de edad.

9. No necesitan alimento prefabricado; sintetizan todo el material celular a partir del CO<sub>2</sub> como única fuente de carbono.

clorofila, a partir del agua (ver Tabla 1 sobre otras modalidades metabólicas). El carbono necesario procede de la atmósfera, donde abundaba y abunda. Hoy se piensa que las bacterias autótrofas que habitaron surgencias de azufre o de hierro en ambientes calientes (aguas termales, fuentes volcánicas submarinas) precedieron a las bacterias heterótrofas.

Con los pigmentos fotosintéticos se garantiza una fuente regular y permanente de energía –la luz solar (radiación 300-700 nm)– para mantener el sistema disipativo que es la vida en marcha. Se aprovecha directamente menos del uno por mil de la energía que procede del sol; pero es más que suficiente para mantener el pulso de la vida y la evolución de la materia viviente.

Tabla 1. Diversidad metabólica

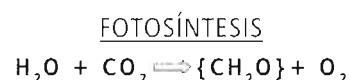
FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA	DONADOR DE ELECTRONES	RECEPTOR DE ELECTRONES	FUENTE DE CARBONO	MEDIO	GRUPOS
Oxidación substrato inorgánico	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	anóxico	Bacterias metanógenas
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	aerobio	Bacterias del hidrógeno
	S, SH <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /orgánica	aerobio	Bacterias del azufre
	Fe <sup>++</sup>	Fe <sup>+++</sup>	CO <sub>2</sub> /orgánica	aerobio	Bacterias del hierro
	NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> /orgánica	aerobio	Bacterias nitrificantes
	NO, N <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	anóxico	Bacterias desnitrificantes
	H <sub>2</sub> , alcohol, ácidos grasos...	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Orgánica	anóxico	Bacterias reductoras del sulfato
Luz solar (fotosíntesis)	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Producen oxígeno	Cianobacterias, algas y plantas
	H <sub>2</sub> , SH <sub>2</sub>	S	CO <sub>2</sub>	anóxico	Bacterias verdes y bacterias rojas
	Comp. orgánico		CO <sub>2</sub> /orgánica	semianóxico	
Oxidación substrato orgánico	Metano	CO <sub>2</sub>	Metano, CO <sub>2</sub>	aerobio	Bacterias metilótrofas
	H <sub>2</sub> , azúcares, alcoholes...	CO <sub>2</sub> , comp. org. reducido	Orgánica	anóxico	Bacterias fermentadoras y levaduras
	Compuestos orgánicos	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /Orgánica	aerobio / anóxico	Bacterias fijadoras del nitrógeno
	Compuestos orgánicos	O <sub>2</sub>	Orgánica	aerobio	Bacterias heterótrofas Animales, Hongos

### Oxígeno en la atmósfera

La fotosíntesis libera oxígeno, un compuesto terriblemente reactivo y tóxico para la vida (forma radicales libres que interfieren en las rutas metabólicas). El O<sub>2</sub> se empieza a acumular en la atmósfera hace unos 2.500 millones de años<sup>10</sup> y continúa a lo largo de 500 ma hasta alcanzar los niveles actuales. El cambio de composición de la atmósfera tuvo que

10. A partir de esta época los sedimentos con hierro son de color rojo; están oxidados.

suponer una hecatombe para la mayoría de las bacterias existentes. Sólo aquéllas que generaron catalasas capaces de reducirlo sobrevivieron; entre ellas, las propias



cianobacterias responsables de la producción masiva de  $\text{O}_2$ . De hecho, fueron también las principales colonizadoras del medio terrestre ya que, hasta el momento, la vida terráquea estaba restringida a mares y sistemas litorales. Además, el  $\text{O}_2$  genera en la atmósfera  $\text{O}_3$ , ozono, que se acumula en las capas superiores formando una barrera a los rayos UV que antes llegaban con fuerza biocida y arrasaban la superficie sólida o líquida del Planeta<sup>11</sup>.

Si hay nutrimento y las condiciones ambientales (temperatura, salinidad, pH, etc.) son favorables, las bacterias son “eternas”; es decir, que no se mueren. Una bacteria se divide en dos (cada media hora, aproximadamente) y así se perpetúa su materia viva<sup>12</sup>. La “innovación” requerida para que funcione como un sistema complejo adaptativo proviene de pequeños errores en la replicación del ADN (=mutaciones) y de la combinación de ADN que se produce durante migraciones “sexuales”. El ADN de las bacterias, o trozos de él, puede abandonar una bacteria, pasar al medio externo y penetrar en otra bacteria atravesando su pared (también puede darse una transferencia directa a través de puentes especiales). Hay gran promiscuidad sexual entre las bacterias y de hecho no se podría hablar de “auténticas” especies, ya que sus genomas no están realmente aislados.

### Gobierno central y simbiogénesis

Las especies biológicas –con genomas aislados– surgen con la aparición de células con núcleo hace 2.000 ma y de la reproducción sexual basada en la meiosis hace 1.500 ma. La célula nucleada –eucariota– es la que cuenta con el material genético –ADN– separado en su citoplasma por una membrana. Es posible que esta característica se adquiriese como medida de protección frente a invasiones de espiroquetas. El ADN se agrupa en cromosomas y es mucho más complejo que el de las células procariotas (bacterias) que se limita a un simple anillo de ADN.

La célula eucariota es muchísimo más voluminosa que la célula bacteriana y ofrece una estructura interna tremendamente organizada, con un citoesqueleto formado a base de retículos y fibras, y numerosos orgánulos que se ocupan de diferentes funciones en su interior (ribosomas, lisosomas, aparato de Golgi, plastos, mitocondrias). La digestión de los alimentos se produce en el interior de la célula y no afuera, como en las bacterias.

Gracias a la bióloga Lynn Margulis, sabemos que a la organización eucariota, tan compleja, no se ha llegado a través de una lenta y progresiva complicación de la célula bacteriana, sino por simbiogénesis<sup>13</sup>. Bacterias que fueron engullidas y no digeridas por otras

---

11. La Tierra cuenta con una magnetosfera que también la protege de la radiación exterior (especialmente de los rayos X)

12. Esto no implica que no se las pueda matar físicamente por exceso de calor, falta de alimento, enzimas catalíticos, antibióticos, radiaciones, etc.

13. Simbiogénesis = generado a través de simbiosis; simbiosis = vida en conjunto.

bacterias fagocíticas (desprovistas ya de su rígida membrana) acabaron por vivir simbióticamente dentro de ellas y luego, perdiendo parte de su ADN y funciones, terminaron por constituirse en orgánulos del “agregado” eucariota. Así ocurrió con espiroquetas, que son el origen de undulipodios (órganos propulsores, flagelos, cilios, etc.), y con arqueobacterias similares a *Thermoplasma*, capaces de usar el  $O_2$  para quemar compuestos carbonados, que se transformaron en las mitocondrias. Estos orgánulos son universales en la vida eucariota que hoy conocemos y reflejan el éxito evolutivo que tuvieron sus hospedantes. El oxígeno pasó de ser un tóxico a convertirse en un elemento clave para la respiración (proceso inverso a la fotosíntesis); fuente de energía para la nueva saga de heterótrofos, mucho más eficiente que la fermentación. Una molécula de glucosa produce por fermentación 2 ATP<sup>14</sup>, frente a los 36 que se obtienen por respiración. La célula eucariota cuenta ahora con un eficiente orgánulo

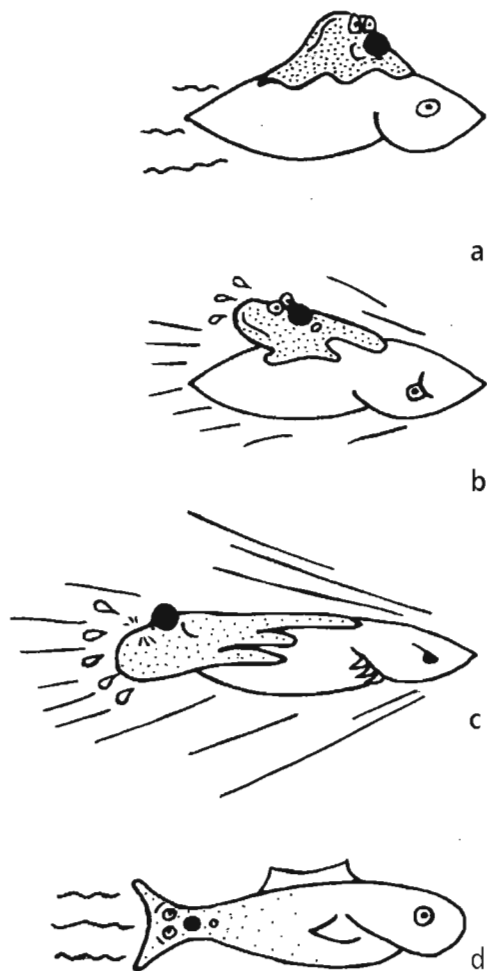
que provee energía, provenga ésta de moléculas fotosintetizadas o ingeridas. Esto representa un buen ejemplo de acoplamiento entre un sistema muy energético (la mitocondria) con otro más “frío”, con más información (el núcleo), que se establece como gobierno central de la célula.

Los cloroplastos de las células vegetales también proceden de endosimbiosis; en este caso de cianobacterias, aunque de varios tipos diferentes. Se distinguen tres grandes linajes: las algas pardas, las algas rojas y las algas verdes y plantas.

### Especiación

Los organismos-quimera resultantes surgen hace unos 2.000 ma, desarrollan la reproducción sexual y con ello la recombinación genética, favoreciendo el mecanismo de variación que garantiza los ensayos necesarios en todo proceso selectivo. Es a partir de aquí que se puede hablar con propiedad de especiación. La diversidad biológica, fruto de la evolución de las especies, se “dispara” a partir del surgimiento de los eucariotas.

Los proctocistas<sup>15</sup> comprenden seres autótrofos y heterótrofos, unicelulares y pluricelulares a medida que las células se agregan, se engarzan (septos, desmosomas), coordinan algunas funciones básicas (movimiento, reproducción, etc.) y luego se van especializando –división del trabajo– para engendrar los diferentes tejidos y órganos que componen los organismos multicelulares más avanzados.



Simbiogénesis según J. Steve Alexander

14. Adenosín-tri-fosfato, molécula “moneda” empleada en el metabolismo para el tránsito químico de energía.  
15. Los proctocistas comprende a los protozoos, las algas y las formas primitivas emparentadas (falsos hongos, etc.). Algunos autores los consideran como un reino, aunque se sabe que no son monofiléticos.

## BREVE HISTORIA DE LA BIOSFERA (en millones de años)

### HADEENSE

4.600	Origen del sistema solar y de La Tierra y La Luna (?)
4.500	Roca más antigua (origen meteorítico) en Arizona, Cañón Diablo
4.400	Emisión de gases del manto a la atmósfera
4.300	Primeros cristales minerales (Australia). Primeros continentes?

### ARQUEENSE

4.000	Formación de la corteza, inicio actividad tectónica
3.900	Origen de las BACTERIAS (procariotas anaeróbicos, Arqueobacterias)
3.800	Carbonato cálcico de origen biológico (Groenlandia)
3.600	Microfósiles (estromatolitos)
3.500	Comunidades bacterianas fotosintéticas
3.300	Trazas de oxígeno gaseoso (atmósfera y sedimentos)
3.000	Aparición de modalidades metabólicas (H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, NH <sub>3</sub> y CH <sub>4</sub> )

### PROTEROZOICO

2.500	Oxígeno empieza a acumularse, Pre-Pangea, sedimentos biógenos
2.200	Profusión de bacterioplancton en los océanos (fijadores de N)
2.100	Engrosamiento de la capa de ozono
2.000	Abundante oxígeno en la atmósfera (organismos aeróbicos)
1.800	Sedimentos de hierro son rojos (oxidados)
1.700	Aparición de los PROTOCTISTAS (primeros eucariotas)
1.600	Organismos planctónicos y bentónicos (aparición mitocondrias?)
1.500	Origen de la mitosis, sexo meiótico y muerte programada
1.400	Cianobacterias colonizan La Tierra (costras desérticas y suelo)
1.300	Diversificación algas pluricelulares (adquisición de plastidios fotosintéticos)
900	Ediacara (protoctistas coloniales no identificados en areniscas)
900	Aparición de los ANIMALES (embrión y blástula), cuerpo blando

### FANEROZOICO

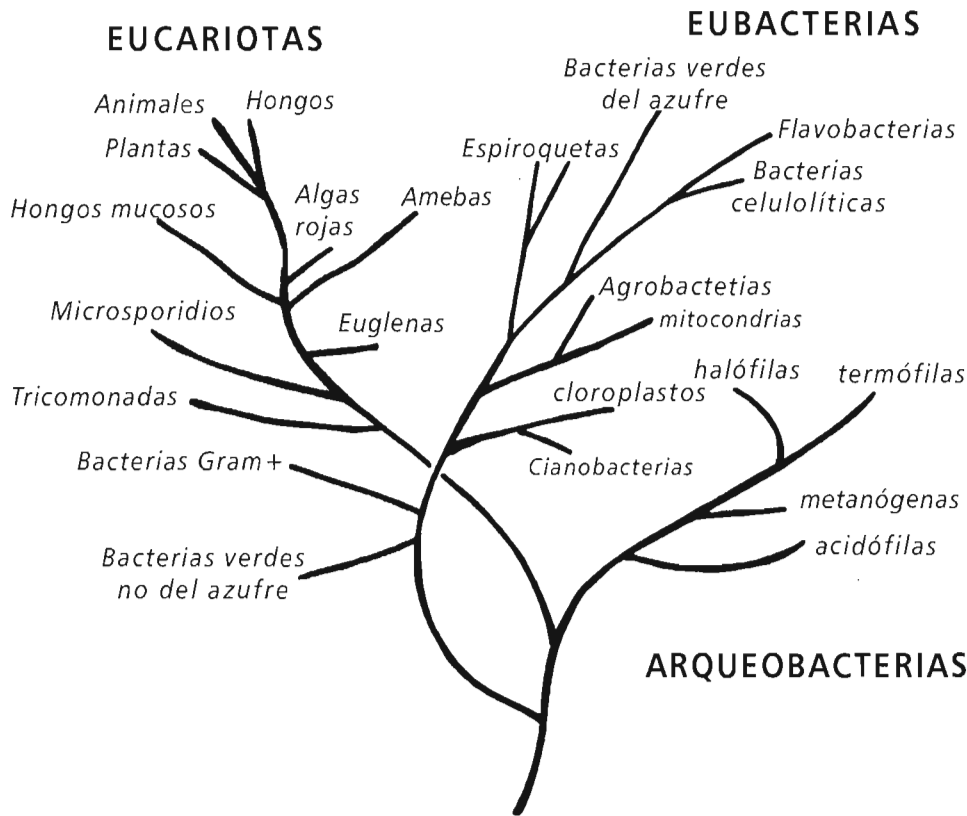
570	Animales duros (trilobites)
500	Colonización de las tierras emergidas por algas e insectos
440	Aparición de PLANTAS y HONGOS (fila terrestres)
400	Tierra cubierta por primeros bosques, plantas con semillas
365	Bosques pantanosos (Carbonífero)
245	Comienza la Edad de los Reptiles (Triásico, Jurásico y Cretácico)
150	Se inicia disgregación del supercontinente Pangea
65	Extinción de los dinosaurios y comienzo de la Edad de los Mamíferos
40	Aparición de las gramíneas y plantas con flor y fruto. Hay Primates
23	Aparición de los hominoideos en África
4,5	Ancistros humanos (homínido bípedo, Australopiteco)
2,5	Género <i>Homo</i> (varias especies)
0,1	Comienzo de la evolución cultural

Cuando ya ha transcurrido el 87% de la historia de La Tierra, hace 600 ma, surge una rama heterótrofa compuesta de seres móviles, los Animales. Se originan en el mar y luego colonizarán la tierra firme (500 ma). También a partir de los protoctistas derivan las Plantas (autótrofos) y luego los Hongos (450 ma); ambos reinos eminentemente terrestres. Recordemos que las tierras emergidas ya son habitables; el ozono protege de los UV y el O<sub>2</sub> lejos de ser un tóxico, favorece el nuevo metabolismo respiratorio. La vida se extiende por todo el Planeta y la biosfera se autoorganiza aceleradamente, sin que ello impida la aparición de importantes innovaciones biológicas, como fueron el mesoderma<sup>16</sup> en los animales triblásticos, las flores en las plantas, o las castas no reproductoras en ciertas comunidades animales, como las hormigas, abejas, etc.

Todos estos nuevos seres –pluricelulares y grandes, en su mayoría–son bastante más complejos que sus ancestros y compañeros de biosfera, las bacterias. Para empezar, son multigenómicos en origen (debido a la simbiogénesis), y la simbiosis o asociación física a largo plazo entre miembros de distintas especies, sigue teniendo ventajas selectivas (más

eficiencia). Muchos insectos xilófagos y animales herbívoros no podrían sobrevivir sin los microorganismos celulolíticos que habitan en sus aparatos digestivos (endosimbiosis); la mayoría de las familias de plantas<sup>17</sup> forman micorrizas (simbiosis de hongo y raíz) que favorecen su metabolismo; y los líquenes (alga /cianobacteria + hongo) son ejemplos paradigmáticos en asunto de simbiosis.

Existe un falso concepto de individualidad de los organismos vivos. Al menos aquéllos que son grandes suelen ser en la realidad “comunidades” de organismos integrados. Nosotros mismos tenemos más bacterias en nuestra boca que habitantes hay en Nueva York.



Árbol filogenético de los principales grupos vivos (basado en Monastersky, 1998, simplificado).

16. Esta capa, situada entre el ectodermo y endodermo, amplió el abanico de estirpes celulares -unas 200- a niveles insospechados, y de ahí la complejidad adquirida por los animales superiores.

17. Son excepción las crucíferas, quenopodiáceas, ciperáceas, cariofiláceas y proteáceas.



## Ecopoyesis

Hemos visto como la vida, con su capacidad autopoyética, se autoorganiza y complica a lo largo del tiempo evolutivo. Pero la vida no actúa en el vacío, sino inmersa en un medio (tipo de substrato, temperatura, humedad, etc.) que la condiciona, del cual obtiene su nutrimento y al cual expelle los residuos de su metabolismo. El concepto de ecopoyesis se ha acuñado para expresar la autoorganización y mantenimiento de los ecosistemas –sistemas con elementos vivos– como algo funcional. La cosa es simple: sin ecopoyesis no habría continuidad en la vida.

Recordemos que un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí, y cuantos más elementos distintos tenga, más posibilidades diferentes de interacción habrá. El sistema resultante será más complejo; menos previsible, menos rígido y, en definitiva, más variable y más adaptable. Así son los ecosistemas, donde los seres vivos que los integran son los propios responsables de su autoorganización.

Tal vez en los comienzos de la vida existía suficiente alimento en el “sirope primordial”, o lo que fuese, y la biosfera no necesitaba productores primarios. Pero cuando éstos surgieron se agudizaron determinados problemas como la progresiva rarefacción de determinados nutrientes (fósforo, potasio, etc.). Productores primarios, consumidores y descomponedores tuvieron que acoplarse en ecosistemas locales, y éstos en ecosistemas de mayor escala, de modo que los nutrientes fueran transportados y, a ser posible, reciclados en su seno. Así, de manera progresiva, se han organizado a escala de la biosfera los grandes ciclos biogeoquímicos, en virtud de los cuales, los elementos esenciales para la vida –carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, etc.– no quedan aparcados de manera definitiva, sino que vuelven a estar disponibles para la materia viviente. Los hongos, por ejemplo, gracias a su capacidad de transporte horizontal, facilitaron la conquista de las tierras emergidas al liberar el fósforo y captar nitrógeno (el suelo es, de hecho, un producto fúngico). Según Margalef, el tiempo medio actual de renovación del carbono en la atmósfera es de 4 años; 16 años en los organismos vivos<sup>18</sup> y unos 40 años en la necromasa o materia orgánica muerta.

El acoplamiento de todos estos ciclos se ha producido a lo largo de la evolución de la biosfera, condicionado por los propios cambios físicos del Planeta (i.e., movimiento de placas), su clima (i.e. glaciaciones), y los provocados por los propios organismos vivos (i.e., oxígeno en la atmósfera). Un largo proceso de autoorganización de la biosfera, no exento de ciertos desajustes. Algunos autores sugieren que el carbón acumulado en los llamados “combustibles fósiles” proviene del lapsus entre la aparición de la lignina y la de los hongos capaces de descomponerla. Es probable que el exceso de producción primaria terrestre fuera arrastrado hasta los fondos anóxicos de los océanos, y allí se transformase en petróleo.

---

18. La biomasa media de La Tierra actual es de 4 kg de carbono por hectárea y el ritmo medio de fijación es de 0,5 gr C/ hectárea/ segundo. Este es el pulso de la vida.

## Energía exosomática

Los ecosistemas y la vida en su interior funcionan no sólo en virtud de la energía – lumínica, en la mayoría de los casos– que se incorpora a la materia viva. Además de esta energía endosomática existe otra, externa o exosomática, que es responsable, entre otras cosas, del transporte de los nutrientes y de muchos seres vivos o sus propágulos. La dinámica del aire y las aguas obedece a esta energía (cambios de temperatura, fuerza de Coriolis, etc.) lo mismo que la evapotranspiración, fenómeno físico que se produce a nivel de hojas en las plantas y que activa el transporte de nutrientes en el interior de estos seres. Margalef calcula que, en general, en los ecosistemas la energía exosomática activa es de 30 a 40 veces mayor que la endosomática.

Estas energías que circulan en el medio tienen mucha importancia y, de hecho, la vida está adaptada a su presencia y fluctuaciones (cuando son regulares). También se aprecia cierta tendencia en los organismos vivos más complejos a querer anticiparse a las fluctuaciones del medio y, en etapas evolutivas más recientes, incluso a manejar y controlar las energías exosomáticas en beneficio propio (termitas, humanos, etc.).

## ¿POR QUÉ LA VIDA ES DIVERSA?

Vernadsky, el creador del concepto de biosfera, jugó con la imagen de la vida en forma de una lámina única y continua cubriendo toda La Tierra; en la actualidad tendría un grosor<sup>19</sup> de poco más de 4 cm. Esto sería tal vez posible si el medio, La Tierra, fuera completamente homogénea. Pero no es así.

## Vocación y obligación

Un sistema complejo adaptativo sometido incluso a un solo criterio selectivo, pero enfrentado a un medio heterogéneo, responde inevitablemente con diversidad; máxime en el caso de la vida, que está empaquetada en unidades discontinuas en el espacio (individuos) y en el tiempo (especies). Esta capacidad de adaptación –y diferenciación– de la vida procede de su peculiar modo de transmitir y acumular información. Las mutaciones y recombinaciones cromosómicas en la reproducción, introducen variabilidad de modo continuo, y sobre el individuo resultante opera la selección natural en toda su amplitud (competencia, factores limitantes, contingencias, etc.), favoreciendo y canalizando determinadas combinaciones de información que se proyectan en el espacio y en el tiempo, o lo que es casi lo mismo, quitando de en medio a las otras.

Además de esta diferenciación gradual y pausada (selección darwiniana), la simbiogénesis nos muestra que pueden darse cambios más o menos bruscos; saltos o grandes “innovaciones” en la evolución. También recientemente se han reconocido procesos

---

19. Biomasa vegetal total =  $1.841 \times 10^9$  Tm, y animal =  $2.002 \times 10^9$  Tm (según R. H. Whittaker, 1975. *Communities and ecosystems*. McMillan, Nueva York).

genéticos (transposones, mutaciones en genes reguladores, etc.) que favorecen este tipo de cambios “de conjunto”. Así pueden verse afectadas rutas metabólicas completas, determinados órganos, pautas de crecimiento, etc. Según parece, la vida cuenta con muchos mecanismos capaces de introducir novedades y generar variación, y recordemos que cuanto mayores sean los organismos involucrados (manejan más información), menores han de ser los cambios para que tengan mayor repercusión. Las diferencias genéticas entre distintas cepas de una misma bacteria superan a veces el 15% de su material genético, mucho más que toda la variación genética que existe entre los mamíferos. La divergencia molecular entre el hombre y nuestro pariente vivo más próximo, el chimpancé, es de sólo un 1,2%.

Así pues, tenemos por un lado la vida, capaz y dispuesta a cambiar y a adaptarse, y por el otro lado, el medio, que es heterogéneo y cambiante. Unos autores, como Richard Dawkins, piensan que el motor de la diversidad de la vida son los genes compitiendo entre ellos, y otros, como el paleontólogo Nils Eldregé, atribuye dicho honor a los cambios ambientales. A nuestro entender, es la concurrencia de ambos fenómenos, movidos por el pulso de la vida, lo que engendra diversidad. La vida es diversa por vocación y por obligación.

### **Biodiversidad**

Que la vida es variada, es algo obvio. Se aprecia al observar las diferencias entre nuestros propios rostros, las miles de especies, los géneros, familias y fila o al comparar las faunas y floras que habitan diferentes hábitats o regiones. También encontramos desemejanzas entre las actuales formas vivas y los fósiles que restan del pasado. Y dentro de los mismos organismos encontramos diversidad a nivel molecular, a nivel genético, a nivel de estirpes celulares, tipos de tejidos, órganos, estructuras morfológicas, capacidades metabólicas, comportamiento y tipos de asociaciones simbióticas. Una simple bacteria puede contener 24,6 millones de macromoléculas de todo tipo repartidas en 2.500 clases diferentes; las proteínas pueden estar compuestas por más de 10.000 aminoácidos, abiertas a toda suerte de combinaciones; los animales cuentan con más de 200 estirpes celulares; el genoma humano puede contener entre 30.000 y 100.000 genes que admiten ininidad combinaciones alélicas ( $10^{605}$ ), etcétera, etcétera. Todo esto son expresiones del tremendo potencial de diversidad de la vida y casi cabría interpretarla como la negación de la uniformidad. Si en el Universo existe una insondable variedad de estrellas, la vida –al menos la que conocemos– representa la mayor concentración de diversidad por unidad de espacio.

Es esta cualidad de la vida de ser variada en sus formas y expresiones lo que se entiende por “biodiversidad” o “diversidad de la vida”, y resulta imposible de medir<sup>20</sup>. Pero el término de biodiversidad ha irrumpido con fuerza en la vida pública con otra acepción: la totalidad de los genes, especies y ecosistemas de una región dada; es decir, un recurso. Con este sentido ha recibido una esperanzadora atención conservacionista y por parte de los

---

20. La diversidad es una función de estructura o información, sin dimensiones físicas.

Tabla 2. Estimación mundial del número de especies descritas

GRUPO	ESPECIES	PORCENTAJE
Bacterias	4.000	0,2 %
Protozoos	29.000	1,7 %
Algas	27.000	1,6 %
Hongos	52.000	3,0 %
Líquenes	20.000	1,2 %
Plantas	270.000	15,7 %
Artrópodos	1.085.000	63,0 %
Otros invertebrados	190.000	11,0 %
Vertebrados	45.000	2,6 %
TOTAL	1.722.000	100 %

Adaptado del *Global Biodiversity Assessment (UNEP, 1995)*

gobiernos, que están enfrascados en el inventario de sus respectivas biodiversidades, aunque ello consista en un mero recuento de especies, todavía muy incompleto.

Frente al millón setecientas mil especies descritas, se calcula que La Tierra actual puede albergar entre 10 y 15 millones de especies, con una gran concentración en los trópicos. Lógicamente, no todas las regiones están igualmente bien estudiadas. En Canarias por ejemplo, se han inventariado un total de 11.600 especies terrestres, prácticamente el 73% de las 16.000 que se estima que habitan el archipiélago; sin embargo, lo más destacable en este caso es que en la última década se

viene describiendo como media una especie nueva cada 6 días<sup>21</sup>. Y no sólo son nuevas especies lo que aportan los descubrimientos más recientes. En 1995 se daba a conocer un extraño animal microscópico que vive parásito en las barbas de las langostas en Noruega; fue nombrado *Symbion pandora* y reconocido como un nuevo filum del Reino Animal, los *Cycliophora*.

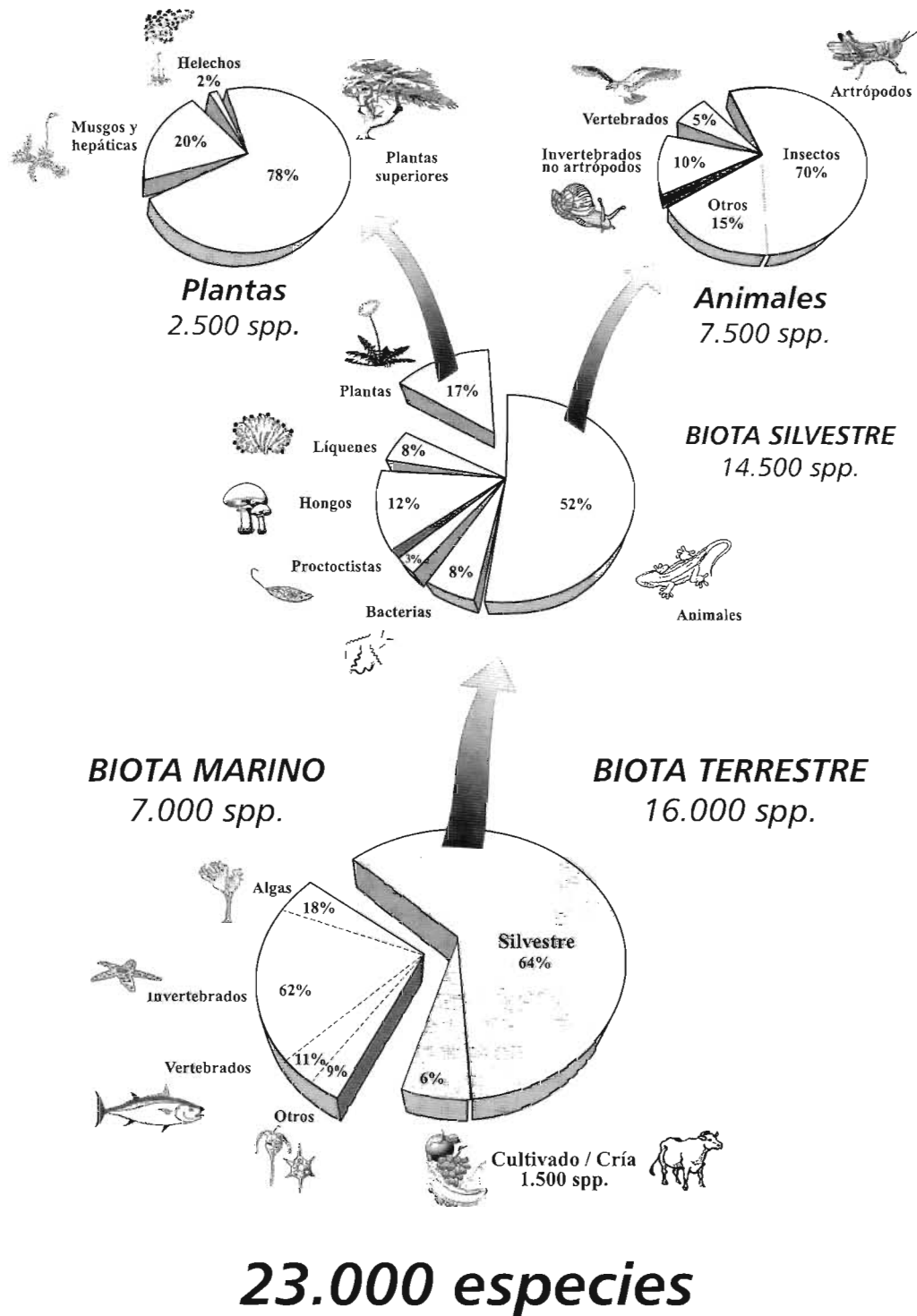
La riqueza de especies no se reparte por igual en la biosfera. Al margen de posibles deficiencias en nutrientes y otros factores ecológicos limitantes de menor efecto, el estrés térmico y el estrés hídrico son las principales causas que coartan la expansión de la vida. Por ello las selvas húmedas de los trópicos, donde no hay heladas ni falta el agua, pueden albergar las mayores biomasas y en ellas se dan también las mayores concentraciones de biodiversidad del Planeta. La estabilidad de estos biomas en el tiempo evolutivo ha permitido "rizar el rizo" en materia de especiación, y estructurar el ecosistema en altura y en micronichos a niveles insospechados en otros biomas. La atención conservacionista se ha centrado mucho en estas enormes bolsas de biodiversidad, así como en otros centros del Planeta, donde por razones biogeográficas e históricas existen altas concentraciones de especies y están amenazadas (*hot spots*).

El enfoque de la biodiversidad como recurso también ha despertado un renovado interés por las razas animales y variedades vegetales fruto de la selección artificial y, últimamente, de la biotecnología (levaduras, cepas bacterianas, etc.). Se trata de formas de vidas en cuya conformación ha intervenido el hombre y su tecnología. Sobre este particular, volveremos en la última sección.

21. J.L. Martín Esquivel, com. pers., 1998.

# BIOTA DE CANARIAS

(datos aproximados)

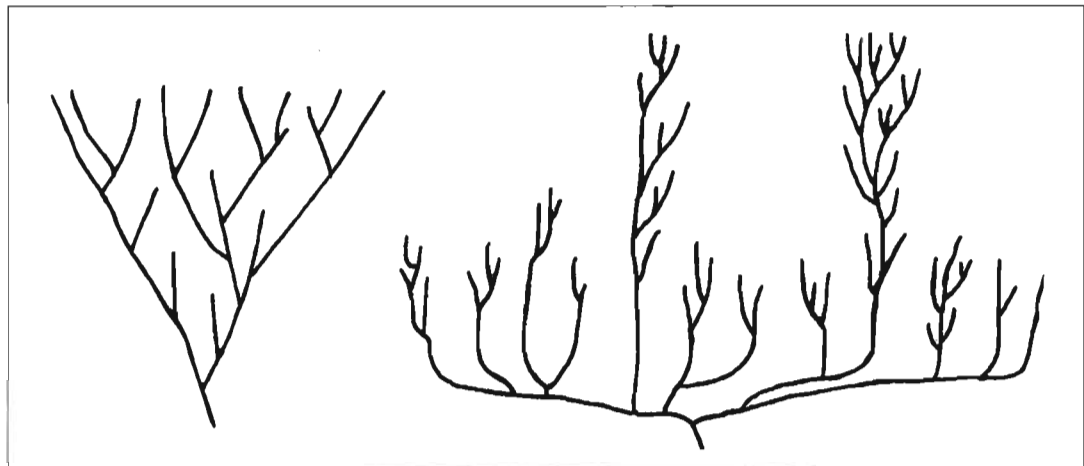


Estimación del número de especies que habitan en Canarias

## Biodisparidad

Un interesante aspecto de la diversidad de la vida, de carácter cualitativo más que cuantitativo, es su biodisparidad, o nivel de semejanza que existe entre los distintos organismos. El término fue introducido por Stephen Jay Gould para destacar los diferentes planes anatómicos o formas de vida que encontró en la fauna fósil de seres de cuerpo blando que poblaron los mares precámbricos (cantera de Burgess Shale, en Canadá). La mayoría de estos seres se extinguieron; de no ser así, hoy serían reconocidos como grupos diferenciados o fila distintos. Según Gould, en la historia de la vida ha habido una notable reducción en disparidad, seguida de un marcado aumento en diversidad dentro de los pocos diseños supervivientes. De hecho, más de la mitad de las especies descritas son insectos, y es muy posible que superen el 80% del número total de especies que existen en la realidad.

Es necesario pues cambiar la tradicional visión de la evolución de la vida como un árbol cuyas ramas se iban dividiendo progresivamente hasta dar la actual panoplia de especies; el llamado "cono" de la biodiversidad. Bajo la óptica de la biodisparidad, la historia de la vida se presenta más bien como un árbol tremendamente podado, con unas pocas ramas que llegaron hasta el presente; eso sí, algunas muy "floridas". Nuestra historia de la vida es la historia de los supervivientes (si pudieran hablar, los muertos aportarían seguramente otra versión de la batallas). Además, conocemos muy pocos fósiles (unas 300.000 especies) y sólo en aquellos grupos que pueden fosilizar.



*Cono de diversidad creciente (izquierda) y modelo revisado de diversificación y diezmación (derecha) sugerido por la reconstrucción adecuada de la fauna de Burgess Shale. S. J. Gould (1991).*

En la biosfera de hoy, la mayor biodisparidad sigue estando concentrada en el medio marino. Todos los fila reconocidos tienen representantes en el mar, con la salvedad de algunos fila de hongos que pueden considerarse como un grupo básicamente terrestre. El repertorio de vida presente en tierra firme es más pobre (aproximadamente un tercio de los fila) pero, dada la heterogeneidad del medio terrestre, es muchísimo más rico en especies, sobre todo tras el éxito y "pulverización" evolutiva de los insectos.

## PRINCIPALES GRUPOS DE SERES VIVOS

### ARQUEOBACTERIAS (3 fila)

Son unicelulares, heterótrofas (fermentadoras, metanófilas, acidófilas, termófilas, etc.); no usan ni producen oxígeno. Tienen un ARN ribosómico diferente al resto de las bacterias. Viven el fondo oceánico, estómago de las vacas, aguas termales, etc.

### EUBACTERIAS (13 fila)

Son unicelulares (aunque pueden agregarse). Gran variedad de modalidades metabólicas (quimiolitotrofas, fotosintéticas, etc.). Pared celular rígida (azúcares y péptidos). Su ADN es circular y está suelto en el líquido celular. Se multiplican por división celular.

### PROTOCTISTAS (37 fila)

Tienen células con núcleo y la meiosis está ampliamente extendida. Los hay unicelulares (mucho mayores que las bacterias) y pluricelulares (de donde surgirán animales, hongos y plantas), pero no desarrollan embriones en su reproducción. Hay grupos heterótrofos (protozoos, falsos hongos) y autótrofos (algas); algunos son sésiles y otros no. Diatomeas y coccolitofóridos son los principales productores primarios en el mar.

### ANIMALES (35 fila)

Son multicelulares y heterótrofos. Se desarrollan a partir de un espermatozoide y un óvulo que generan un embrión suelto, una blástula (bola de células, hueca). Son sensibles y activos (sistema nervioso muy desarrollado). Fusión sexual libre o *in vivo*. Abundan más en el agua que en la tierra.

### HONGOS (5 fila)

Seres de estructura fractal. Forman micelios clónicos y poseen paredes celulares con quitina. Son descomponedores de macromoléculas orgánicas (digieren fuera del cuerpo y luego ingieren). Reproducción sexuada por esporas o asexuada por gemación (no forman embriones). No tienen flagelos ni cilios. Grupo eminentemente terrestre.

### PLANTAS (10 fila)

Seres autótrofos con un ciclo vital complejo: los gametos masculino y femenino provienen de mitosis a partir de plántulas haploides originadas por esporas/polen que sí provienen de meiosis. Son sésiles y carecen de sistema nervioso. Comunicación por hormonas. Algunas han desarrollado estructuras de lignina (leñosidad). Son los principales productores primarios en la tierra.

(datos sobre fila tomados de Gaston y Spicer, 1998)

## Perturbaciones

Las perturbaciones juegan un papel importante en la diversidad de la vida, tanto en su historia evolutiva como en lo cotidiano, a nivel de ecosistema. La biodiversidad cae en un ecosistema como consecuencia de una gran perturbación (u otro tipo cualquiera de estrés



general). Luego, la sucesión ecológica se encarga de devolver el ecosistema a estados más maduros, más estables y más ricos en biodiversidad (= más información). Esto ocurre, claro está, si existen a mano (p.ej. banco de semillas) especies capaces de afrontar las nuevas condiciones ambientales impuestas por la perturbación.

La organismos vivos están adaptados a las condiciones de su medio incluidos los cambios que habitual o regularmente se producen en él (estaciones del año, variación del alimento, etc.). Las perturbaciones implican cambios “bruscos” y no predecibles, que someten a “prueba” las capacidades de los organismos vivos. Consecuentemente, las grandes perturbaciones suponen grandes pruebas, y no son muchos los afortunados que superan estos exámenes.

La historia de la vida está jalonada de extinciones de grupos enteros y aparición de otros nuevos, lo que a menudo ocurre de forma relativamente brusca (discontinuidades que se emplean para dividir los periodos geológicos). Según se va conociendo, muchos de estas

inflexiones en el devenir evolutivo están vinculadas a grandes perturbaciones. Viene a colación el meteorito que impactó en La Tierra a finales del Cretácico (66 ma) y a cuyo efecto se atribuye la subsiguiente extinción de los dinosaurios, dando cancha libre a los mamíferos. En el Pérmico, hace 245 millones de años, se cree que hubo un enfriamiento global del Planeta que arrasó con el 95-98% de todas las formas vivas existentes.

Las perturbaciones son una excelente manera de excitar a un sistema complejo adaptativo. El cambio impuesto –con mayor o menor brusquedad– no lo resisten algunas especies y sucumben; otras lo toleran sin más o son capaces de acomodarse a él, y otras descubren que contaban con determinadas características que en el nuevo ambiente resultan más ventajosas; a veces se trata incluso de órganos que fueron “concebidos” para otras funciones y que ahora adquieren un valor adaptativo positivo. Estas especies afortunadas se ven favorecidas por la nueva selección natural y no resulta improbable que de ellas acabe por surgir un nuevo grupo. Muchos autores reconocen en las perturbaciones



*La selva tropical húmeda alberga las mayores concentraciones de biodiversidad en La Tierra.*

—en ocasiones catalogadas como catástrofes— un factor dinamizador de la innovación evolutiva; promueven la biodisparidad.

La receta de un sesudo alquimista para obtener biodiversidad podría ser la siguiente: “Tómese algo de vida, póngase en un medio heterogéneo y déjese correr el tiempo. Si a estos tres componentes se le añaden unos pellizcos de perturbaciones; entonces, el resultado se obtendrá más pronto y será más vistoso”.

## ¿HACIA DÓNDE VA LA VIDA?

Hay físicos como J. Doyne Farmer, del Instituto de Santa Fe, que piensan que la vida es consecuencia de la evolución espontánea de la materia. Por el momento, no conocemos otras formas de vida en el Universo explorado (que es muy poco), pero al menos la presencia de planetas que estén o hayan estado en condiciones de habitabilidad (agua líquida) parece más que razonable atendiendo a la leyes de probabilidades. No sabemos si de darse las condiciones de habitabilidad la vida surgiría de forma espontánea, o si se trata de una peculiar contingencia de La Tierra. Un dato a favor de la primera hipótesis es la temprana aparición de la vida en La Tierra; tan pronto como se dan condiciones de habitabilidad al finalizar el Hadeense, surge la vida (indicios de células con 3.860 ma de antigüedad). Algunos teóricos de la vida no creen que haya habido tiempo suficiente para el desarrollo de la química prebiótica en tan poco tiempo y postulan que la vida debió originarse en otro lugar y luego arribar ya activa a La Tierra. Esto entronca con la vieja idea de Arrhenius (1939) sobre la panspermia, perfilándose Marte como uno de los candidatos más probables.

Por otra parte, La Tierra se encuentra en una posición marginal, casi de frontera, dentro de la ventana de habitabilidad (temperatura adecuada, suficiente gravedad, etc.) que existe en nuestro sistema solar. Y la novedad y creatividad se establece en las sistemas no lineales en las fronteras, donde la criticidad (cambios de fase) es alta. Luego, también cabe la sospecha razonable de que la vida pudiera ser hija del caos (y no necesariamente hija única). Ahora bien, al margen de cuál sea la razón de su origen —azar o destino—, las condiciones cósmicas favorables para la vida y sus innovaciones en nuestro Planeta no parece que vayan a cambiar sensiblemente en los próximos eones.

## Restricción y libertad

En principio, la vida va a seguir la inercia de su propio impulso evolutivo, con bastante libertad pero con cierto orden<sup>22</sup>. La vida, como propiedad emergente de la física y la química está sometida a las restricciones que le imponen estos ámbitos; particularmente la termodinámica. Y aún así, superadas estas restricciones, la evolución no trabaja sobre una

---

22. Todo sistema complejo adaptativo requiere la concurrencia de suficiente cambio/caos para generar variabilidad, pero no demasiado para que no se descalabre su funcionamiento; consecuentemente es necesario mantener cierto orden, pero tampoco excesivo pues el sistema resultaría rígido e incapaz de evolucionar.

hoja en blanco. La vida es historia, es contingencia, de manera que las futuras opciones están fuertemente condicionadas por las situaciones previas. No es lo mismo planear *ex novo* una estructura para volar, que transformar en ala la estructura de una pata diseñada originariamente para caminar. La vida construye sobre vida, y esto, a la vez que una restricción, es también una ventaja considerable (recuérdese, por ejemplo, el potencial de la simbiogénesis).

Muchos biólogos perciben en la vida algún tipo de "principio vital" que es su fuerza motriz. Particularmente nos gusta invocar un principio de expansión (que probablemente sea mera consecuencia y no un principio); otros hablan de "fuerza vital", "potencial biótico", etc. Los físicos "duros" (mecanocuánticos) como Gell-Mann son muy críticos con estas posturas y no admiten ninguna posibilidad que no tenga un origen fisicoquímico. Puede que la física de la información acabe por desvelar algún principio variacional que apacigüe un poco este desasosiego casi místico de los biólogos y biófilos. Pero posiblemente los físicos estén en lo cierto, y la vida no sea más que un fenómeno fisicoquímico que una vez se puso en marcha ya no puede parar (sistema autoexitativo).

### **Información en alza**

Todo cambio en la materia genera información. La materia viva acumula y proyecta en el tiempo su propia información acumulada. Con la aparición del sexo, se canaliza esta transmisión, se estabiliza<sup>23</sup> y explora la variabilidad (bajo un régimen controlado), pero también se implanta la muerte programada en la célula eucariota. Así, la muerte del individuo viene a representar la pérdida de "memoria" o necesidad de olvido que todo sistema complejo adaptativo requiere si quiere ser innovador y progresar. Lo mismo ocurre a nivel de evolución; la extinción de las especies representa también una pérdida de memoria, y las grandes extinciones parecen sugerir pautas caóticas que, en principio, propician más diversidad en las formas vivas. Todo parece indicar, pues, que la vida va a seguir haciendo lo mismo que ha venido haciendo hasta la fecha: generar más vida, más diversidad, más complejidad, más información.

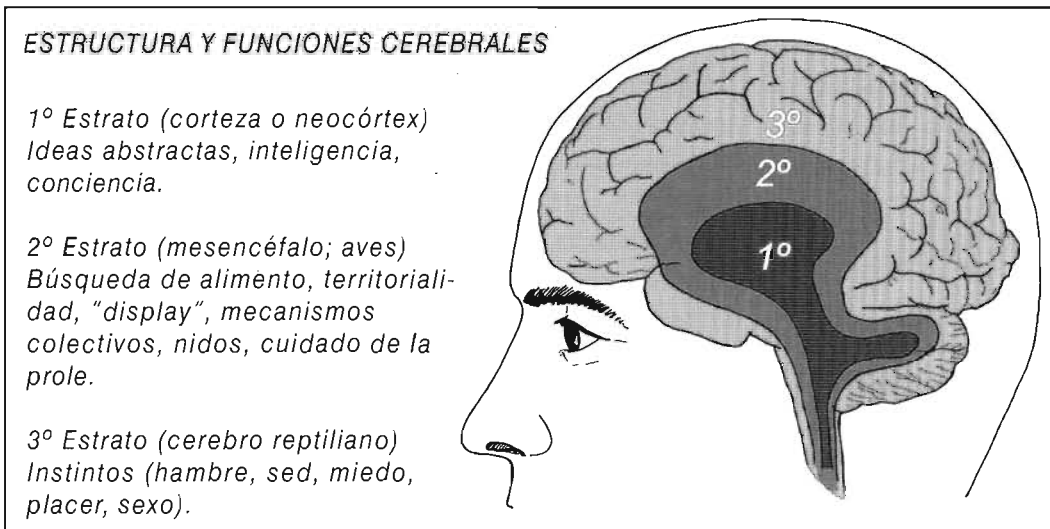
Si analizamos la evolución de la vida bajo la óptica de la información, es fácil reconocer como se ha ido produciendo un aceleramiento progresivo en la complicación, innovación y diversificación –más información– de la materia vida. Sin ir más lejos, los animales surgen cuando ya ha transcurrido el 85% de la historia de la vida, y no cabe duda que en ellos se han conseguido las cotas de mayor complejidad estructural y de tránsito de información. No es infrecuente que un sistema complejo adaptativo acabe por generar otros sistemas complejos adaptativos. Este es el caso, por ejemplo, del sistema inmunológico de los mamíferos, capaz de producir millones de anticuerpos distintos. Evidentemente, la vida acumula información, y ya se comentó que, cuanto más información contenga un sistema, mejor rendimiento sacará a toda nueva entrada de información en él. Esta es, seguramente, la razón del aceleramiento observado.

---

23. Las moléculas de ADN son más estables que las de ARN. Además, en los primates surgen mecanismos de reparación del ADN.

## Materia pensante

Los animales, siendo móviles, adoptan sistemas sensoriales que favorecen la comunicación y la búsqueda de alimento (las plantas, sésiles, no necesitan sistemas nerviosos y se comunican por vía química mediante hormonas). El sistema nervioso es otro sistema complejo adaptativo que se autoorganiza e incorpora información a ritmo aún más acelerado<sup>24</sup>. La complicación del sistema nervioso va aparejada a la de su funcionamiento (mayor capacidad de almacenar y manejar información), y así han ido organizándose las distintas capas del cerebro, hasta llegar al cerebro humano donde surge la mente.



La mente –materia pensante– es una propiedad emergente de la vida, como ésta lo es de la química y ésta de la física. Es, asimismo, un sistema complejo adaptativo cercano a un punto crítico o de frontera<sup>25</sup>. Su gestación es muy reciente en la evolución del Universo (hasta donde conocemos) y Farmer asegura que es también una consecuencia lógica de la evolución espontánea de la materia. Podría ser...

En la mente activa casi todo es contingencia; hay memoria e innovación. Su funcionamiento es realmente complejo (redes neuronales interactuantes y fluidas) y sigue sin desvelarse del todo, aunque podamos reconocer fácilmente algunas de sus cualidades (anticipar las consecuencias de las acciones; comportamiento ético o moral, etc.). Según Salovey y Mayer apenas usamos el 0,1% de la actividad cognitiva.

La mente se apoya fuertemente en el lenguaje –y actúa sobre él–, una capacidad incipiente en otras especies, pero que en la nuestra coevolucionó con las necesarias adaptaciones del aparato fonador hasta adquirir un alto grado de perfección. Los lactantes humanos tienen la laringe en la misma posición que el resto de los mamíferos y pueden respirar

24. El empalme de neuronas subsiste si funcionan en circuito; si el entorno las solicita.

25. Ricard V. Solé y sus colaboradores han aplicado la teoría del caos al estudio de las ondas cerebrales encontrando que existe caos determinista.

mientras maman. Luego, pasado los dos años de edad, la laringe desciende por el esófago permitiendo la producción del sonido “base” que permite el habla. El desarrollo del lenguaje –también un sistema complejo adaptativo– aportó claras ventajas comunicativas en el seno del grupo, favoreciendo el altruismo y la cooperación. Además, el lenguaje –hablado o escrito– constituye un nuevo canal de transmisión de información distinto al habitual en seres vivos: el canal genético. La información (experiencia) adquirida por unos individuos puede pasar directamente a otros, a la generación siguiente o incluso ser compartida a distancia (libros, radio, televisión, internet, etc.). Y esto ocurre a una velocidad hasta este momento desconocida en la naturaleza. De nuevo, la información se acelera.

### Noosfera

Con la irrupción de la materia pensante en el Planeta surge la herencia cultural que es “lamarckiana”<sup>26</sup>. Por eso la evolución cultural es mucho más rápida que la biológica darwiniana. Su impacto en la biosfera no ha tardado mucho en dejarse sentir. La inteligencia<sup>27</sup> humana ha desarrollado tecnología; manipula ingentes cantidades de información y controla las energías exosomáticas como hasta ahora no ha hecho ninguna especie (además de liberar combustibles fósiles). Surgen infinidad de artefactos que son replicados mediante tecnología y cuyos diseños también pueden evolucionar (muebles, vehículos, vestidos, etc.); son lo que Cavalli-Sforza y Feldman llaman organismos de segundo orden. La mente del hombre también ha producido moléculas sintéticas y elementos químicos desconocidos en natura (isótopos de laboratorio) y ha permitido a nuestra especie y sus artilugios abandonar la biosfera y regresar a ella (eso sí, acompañado de muchas bacterias). Su último logro es la biotecnología que abre las puertas a la “creación” de especies mediante manipulación genética, lo que va mucho más allá de la selección artificial practicada hasta la fecha. Otro resultado indirecto derivado de la mente y no menos importante, es el haber desbaratado –mezcla de razas– el proceso de especiación geográfica que estaba en marcha en *Homo sapiens*.

Todo esto es nuevo en la biosfera y no resultaría descabellado rescatar el término de “noosfera” (noos = inteligencia) acuñado por Le Roy y Teilhard de Chardín, para designar al nuevo sistema global, en el que coexisten materia viva y materia pensante, evolución biológica darwiniana y evolución cultural lamarkiana, elementos naturales y artilugios. Al igual que la primera vesícula replicante y autopoyética de la sopa primordial inició la biosfera, con la aparición de la mente consciente comenzaría la noosfera que la reemplaza. La biosfera ha evolucionado hacia una noosfera.

Al menos en La Tierra, el Universo es capaz de pensarse a sí mismo. Este sí es un “mérito” cierto y objetivo reconocible a la especie humana, y lejos del sesgo antropocéntrico que ha venido marcando todas nuestras interpretaciones históricas del Universo. Ahora sólo

---

26. Lamarck pensaba erróneamente que las cualidades biológicas adquiridas por un progenitor en su vida (una fuerte musculatura, por ejemplo) eran directamente transmisibles a la descendencia.

27. La inteligencia se suele definir como la capacidad de iniciar, dirigir y controlar las propias operaciones mentales, entendiendo como tales las que manejan información.

queda por averiguar si hay materia pensante en otros planetas o si en otras especies terráneas pudiera surgir la mente. Científicos de GenoPlex (Denver) que investigan sobre genes de chimpancés por motivos médicos, consideran que la capacidad cognitiva de los humanos radica en sólo 50 genes<sup>28</sup>.

### Reflexión final

¿Hacia dónde va la vida? Las predicciones son el talón de Aquiles de la Ciencia. Probablemente sólo exista cierto margen de predicción real en el ámbito de la termodinámica; a partir de ella, comienzan las arenas movedizas. Podemos estudiar las regularidades que observamos en la naturaleza, analizar algunas tendencias y considerar un espectro de probabilidades. Sin embargo, todo paso que da la selección natural sobre la materia viva supone una opción de las muchas posibilidades que existen. Tal opción marca un camino y cierra las puertas a las restantes opciones. Ya dijimos, que la evolución es un proceso histórico preñado de contingencia.

Los condicionantes y restricciones que gobiernan los procesos vitales siguen estando ahí y no hay razón para que cambien. La vida, en principio, va a seguir las mismas pautas que venimos observando. Aparecerán nuevos organismos, algunos más complicados, otros más diversos, agrupados o no, y con tendencia a adquirir mayor tamaño (individual o colectivo) ya que tendrán más capacidad de manejar información y gobernar su entorno. También es posible que sobrevenga una nueva gran extinción, como ya ha postulado Nils Eldrege. Pero quedará vida y ésta hará prosperar la biodiversidad. En resumen, más de lo mismo.

No obstante, hay una circunstancia nueva para la vida presente en La Tierra, y es que tiene que compartir el Planeta con la mente, que está soportada por la propia vida; al menos, por una parte de ella. Ello, ciertamente, introduce un matiz en nuestra pregunta. ¿Hacia dónde va la vida en la noosfera?

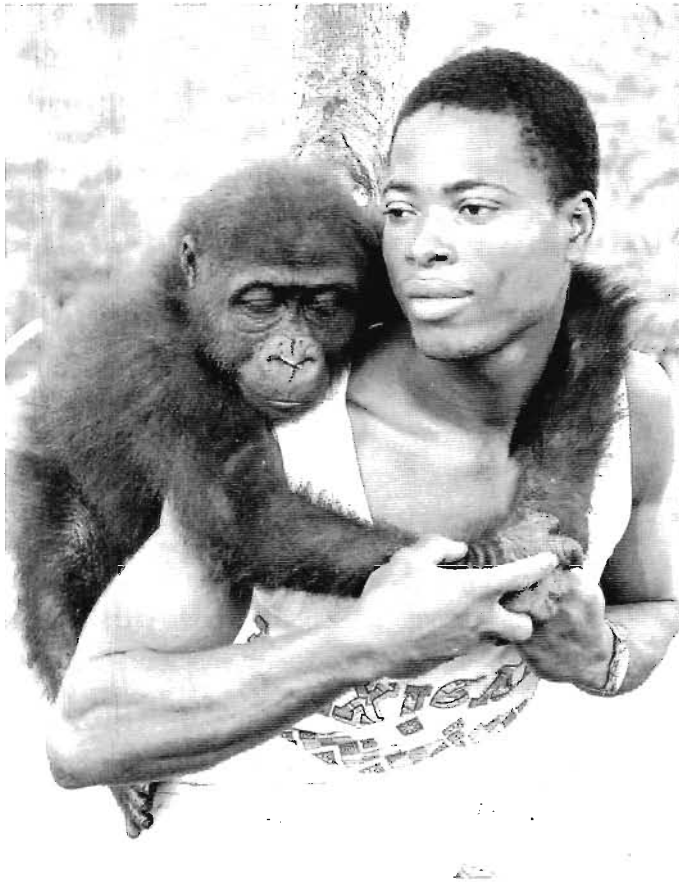
El hombre tiene un importante impacto en la noosfera. Por una parte, provoca alteraciones en los ecosistemas liberando energía o transformando directamente el medio como han hecho otras muchas especies a lo largo de la historia de la vida. Y los ecosistemas responden y responderán como ante cualquier otro tipo de estrés ambiental: aceleramiento general, pérdida de biomasa y diversidad, etc. Los humanos civilizados somos realmente revoltosos, pues amplificamos nuestro impacto a través del control de las energías exosomáticas (*sensu lato*), pero en este aspecto no somos cualitativamente tan diferentes a otras especies. Liberamos energía, oxidamos el entorno e, inevitablemente, devoramos biodiversidad. La biosfera ya ha pasado por tragos similares, y tal vez peores.

Sin embargo, la aparición de moléculas recalcitrantes fruto de la industria del hombre, o la futura saga de "frankensteins" o seres antropogénicos, sí que plantean situaciones

---

28. Nicholas Wade, El País (25 octubre 1998).

realmente nuevas frente al pasado. La vida heredada ha coevolucionado a lo largo del tiempo y ahora va a operar junto a organismos vivos de compatibilidad no probada. Habrá nuevos genomas diseñados por el hombre y cuyo comportamiento puede ir más allá del previsto, por muchas cautelas que guarden nuestros biotecnólogos. Sin ir más lejos, las bacterias recombinantes de diseño pueden liberar plásmidos que acaben dentro de otras bacterias ajenas al experimento. El hombre podrá manipular voluntariamente sus propios genes. Estas potencialidades e incertidumbres son objeto de intenso debate en la actualidad, tanto desde su punto de vista técnico como ético. Y poco podemos predecir sobre los futuros aciertos o insensateces del hombre.



*La divergencia molecular entre el ADN del hombre y el de un gorila es de sólo 1,4%, y nuestra capacidad cognitiva parece radicar en apenas unos 50 genes.*

Si uno fuese un observador externo al Planeta y en vez de fijarse en los elementos clásicos, materia y energía, o espacio y tiempo, centrarse su atención en la información, tal vez obtendría una imagen diferente. Los estudios de termodinámica de la información están muy poco desarrollados, pero es fácil apreciar un incremento de la misma a medida que el Universo se expande, se enfría y se hace más denso. Pero, además, en La Tierra la acumulación y tránsito de información se acelera progresivamente, partiendo de la evolución química, luego en la evolución biológica y ahora con la evolución cultural. La información vinculada a la materia viva ha llenado prácticamente todos los recovecos de la superficie del Planeta e incluso ha logrado—con ayuda de la mente—darse algún que otro paseo por el vecindario. La información vinculada a la materia pensante y la derivada de ella—esto es lo nuevo—también ha copado el Planeta y con mucha más intensidad (para hacernos una idea imaginemos que las ondas de radio o televisión fueran visibles). La información derivada de la mente (mensajes) y soportada por la tecnología electrónica ha superado los confines del Planeta y de nuestro sistema solar. La Tierra emite información en forma de radiación electromagnética estructurada hacia

todo el Universo. Somos un Planeta tremendamente “ruidoso” en el cosmos.

La expansión de la vida a la que ya hemos aludido con anterioridad, parece enfrentarse a barreras físicas, y es probable que no pueda superar su confinamiento dentro de nuestro Planeta o vecindad inmediata. Sin embargo, la información parece no sólo acelerarse, sino expandirse con más éxito una vez liberada de su soporte viviente (mensajes electromagnéticos). Cabe incluso especular con la posibilidad de que la mente acabe por encontrar la manera de operar sobre soportes materiales no vivos, es decir, sobre organismos



de 2º orden o máquinas que funcionen con energía eléctrica (ordenadores cuánticos con capacidad para la consciencia y la empatía). Pero esto ya es ciencia-ficción y la pregunta de ¿hacia dónde va la mente?, rebasa los propósitos de este ensayo.

Por lo pronto, parece seguro que la mente, que apenas ha iniciado su andadura en la noosfera, va a influir sobre la vida. Podemos, eso sí, esperar de la mente que tome autoconsciencia de ello, y esto ya es algo. Pero, si no sabemos hacia dónde va la mente, tampoco podremos aventurar mucho sobre el futuro de la vida, de modo que, en respuesta a la pregunta que encabeza este apartado ¿hacia dónde va la vida?, nos conformamos con una frase de Ian Malcolm, el sugestivo personaje de Michael Crichton en Parque Jurásico: *"La vida se abre camino..."*.

## BIBLIOGRAFÍA

- AGUSTÍ, J. (ed.). 1996. *La lógica de las extinciones*. Metatemas 42. Tusquets Editores., Barcelona.
- ANGUITA VIRELLA, F. 1988. *Origen e historia de la Tierra*. Editorial Rueda, Alcorcón.
- ARSUAGA, J.L. y MARTÍNEZ, I. 1998. *La especie elegida. La larga marcha de la evolución humana*. Ediciones Temas de Hoy, Madrid.
- AYALA, F. J. 1994. *La teoría de la evolución; de Darwin a los últimos avances de la genética*. Ediciones Temas de Hoy, Madrid.
- BACHAU, V. y LESSELLS, K. 1997. La selección natural, principio necesario y suficiente. *Mundo científico*, 179: 466-470.
- BELL, G. 1988. *Sex and death in protozoa. The history of an obsession*. Cambridge University Press, Cambridge.
- BROCKMAN, J. (ed.) 1996. *La tercera cultura. Más allá de la revolución científica*. Tusquets Editores, Barcelona.
- CAIRNS-SMITH, A.G. 1990. *Siete pistas sobre el origen de la vida*. Alianza, Ediciones del Prado, Madrid.
- CAVALLI-SFORZA, L.L. y FELDMAN, M.W. 1981. *Cultural transmission and evolution. A quantitative approach*. Princeton University Press, Princeton.
- DE DUVE, Ch. 1996. El origen de las células eucariotas. *Investigación y Ciencia*, 237: 18-26.
- DE ROSNAY, J. 1993. *Qué es la vida*. Biblioteca científica Salvat, Madrid.
- FUSTER, J. M. 1997. Redes de memoria. *Investigación y Ciencia*, 250: 74-83.
- GASTON, K.J. y SPICER, J.I. 1998. *Biodiversity, an introduction*. Blackwell Science, Nueva York.
- GELL-MANN, M. 1995. *El quark y el jaguar*. Tusquets Editores, Barcelona.
- GOLDSMIDT, D. 1997. *The hunt for life on Mars*. Dutton, Nueva York.
- KAPISC, J.-J. y SONIGO, P., 1998. Elogio del azar y de la selección. El DNA no detenta todos los secretos de las formas vivas. *Mundo Científico*, 188: 40-43.
- LAITHWAITE, E. 1994. *An inventor in the garden of Eden*. Cambridge University Press, Cambridge.
- LEWONTIN, R. C. 1978. La adaptación. *Investigación y Ciencia*, 26: 139-149.
- LURIÉ, D. y WAGENSBERG, J. 1979. Termodinámica de la evolución biológica. *Investigación y Ciencia*, 30, 102.
- MACHADO, A. 1998. *Biodiversidad. Un paseo por el concepto y las Islas Canarias*. Cabildo Insular de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife.
- MARGALEF, R. 1995. La ecología, entre la vida real y la física teórica. *Investigación y Ciencia*, 225: 66-73
- MARGALEF, R. 1991. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Publicacions de la Universitat de Barcelona, Barcelona.
- MARGULIS, L. y SAGAN, D. 1995. *¿Qué es la vida?*.- Metatemas 45, Tusquets Editores, Barcelona.
- MILLER, R.V. 1998. Intercambio de genes bacterianos en la naturaleza.- *Investigación y Ciencia*, 258: 12-17
- MONASTERSKY, R. 1998. El origen de la vida sobre La Tierra. *National Geographic*, 2(3): 58-81.
- PRIGOGINE, I. 1972. La thermodynamique de la vie. *La Recherche*, 3: 24, 47.
- REEVES, H., ROSNAY, J. d., COPPENS, Y. y SIMMONET, D. 1997. *La historia más bella del mundo. Los secretos de nuestros orígenes*. Editorial Anagrama, Barcelona.
- SELOSSE, M.-A. y LOISEAUZ de GOËR, S. 1997. La saga de la endosimbiosis. Las mitocondrias y los plastos, testigos y actores de la evolución. *Mundo Científico*, 179: 436-441.
- SOLÉ, R. V., 1996. Complejidad en la frontera del caos. *Investigación y Ciencia*, 236: 14-21.
- SCHRÖDINGER, E. 1997. *¿Qué es la vida?* Metatemas 1. Tusquets Editores, Barcelona.
- TRIGO I RODRÍGUEZ, J.M. 1998. Vida en el Universo. *Mundo Científico*, 186: 15-19.
- VERNADSKY, V.I. 1997 (reedición). *La Biosfera*. Fundación Argentaria, Madrid.
- WILSON, E. O. 1994. *La diversidad de la vida. En defensa de la pluralidad biológica*.-Círculo de Lectores, Barcelona.



*Samolus foliosus*  
- alaki

