

# **EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR, LA CELULA Y LA VIDA**

**JUAN POLAINO  
Y  
FEDERICO ROMERO**

<http://www.maslibertad.com/religion/ideario/sissolar.htm>



# EL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR, LA CELULA Y LA VIDA<sup>1</sup>

Por Juan Poaino y Federico Romero

---

## **Formación del sistema solar**

Hace unos seis mil millones de años, la zona conocida como El Sistema Solar era una nube de Hidrógeno con un poco de Helio y algunos rastos de otros elementos. Debido a la atracción gravitatoria esa nube de gas comenzó a aglomerarse en el centro. Conforme la materia caía hacia el interior de la nube la presión fue haciéndose cada vez más grande. Al mismo tiempo, como los átomos llevaban un movimiento propio antes de comenzar a caer, la nube comenzó a girar sobre sí misma. Los remolinos de la caída de nubes de gas se formaban en todas las direcciones pero el choque entre unas y otras corrientes hizo que las corrientes más débiles se desviasen para unirse a las corrientes más fuertes, hasta que por fin todas las corrientes de gases se unieron en un único remolino de gas que giraba en una dirección determinada, el mismo plano en el que hoy en día aún sigue girando el Sol.

En esta nube de gases se volvió a repetir, a escala más reducida, el mismo proceso formándose nubes más pequeñas que giraban sobre sí mismas al tiempo que se trasladaban alrededor de la nube central. Se formaron varios cientos de planetesimales girando sobre sí mismos y viajando alrededor de la nube central, pero los planetesimales más

---

<sup>1</sup> Texto obtenido de las páginas webs de Juan Polaino y Federico Romero  
<http://www.maslibertad.com/religion/ideario/sissolar.htm>

grandes, al pasar cerca de los más pequeños los hacían salirse de su órbita. En la zona media del sistema solar, a mitad de camino entre el centro y el borde de la nube primigenia, se formaron dos planetas gigantes que absorbieron la mayor parte de los gases que existían en esa zona.

Había otros muchos planetesimales que se habían formado en el Sistema, pero la masa gigantesca de Júpiter y Saturno "barrieron" sus órbitas de tal forma que los planetesimales más cercanos fueron absorbidos por Júpiter y Saturno haciéndose ellos mismos aún más masivos. Pero a mayores distancias, tanto en la parte interior como en la exterior, aún quedaban muchos más planetesimales.

Aún a larga distancia los efectos gravitatorios de Júpiter y Saturno se hacían sentir eliminando los planetesimales que ocupaban órbitas armónicas. Si un planeta interior tenía un período orbital tal que su año durase exactamente la mitad, o un cuarto, o un quinto, o una fracción exacta cualquiera del año de Júpiter o Saturno, eso hacía que su afelio cada X años coincidiría con la distancia más corta a Júpiter. El efecto de este acercamiento en un año determinado apenas sería apreciable, pero si cada cuatro años, por ejemplo, el acercamiento se volvía a repetir en condiciones muy similares, el efecto acumulativo de la atracción de Júpiter iría alargando la órbita del planeta interior hasta que en unos pocos millones de años su órbita dejase de ser estable, corriendo el peligro de estrellarse con otros planetas o incluso ser absorbido por los mismos Júpiter y Saturno.

Por ese motivo se produjeron varias catástrofes planetarias en las que diversos planetesimales chocaban entre sí para unirse en planetesimales más grandes. Conforme estos planetesimales avanzaban a través de la nebulosa solar eran bombardeados por partículas y meteoritos que provocaban un calentamiento de la materia que los formaba al mismo tiempo que los frenaban, lo que ocasionaba que los planetesimales más pequeños cayesen hacia los mayores.

Al final, tras varios cientos de millones de años de evolución planetaria, el sistema solar estaba compuesto por un centro masivo pero aún apagado, un par de gigantes planetesimales (Júpiter y Saturno), cuatro

planetas interiores (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) y dos exteriores (Urano y Neptuno). El destino probable de aquellos planetesimales hubiera sido seguir siendo frenados por la nebulosa solar hasta que primero los planetesimales más pequeños, luego los mayores, cayeran en la nube central. Solo una cosa evitó que se produjera este fin: La formación del Sol.

A pesar de la enorme masa que representaban los planetesimales que se habían formado, ésto no era más que una minúscula fracción de la cantidad de masa que se había acumulado en el centro del sistema. Esta masa era tan grande que la fuerza gravitatoria alcanzó proporciones gigantescas, y la presión que se acumuló en su centro fue tanta que ni siquiera los electrones eran capaces de soportar la presión de los miles de kilómetros de gas que tenían sobre ellos.

Al final hasta los mismos átomos cedieron. Incapaces de soportar semejante presión los átomos de hidrógeno comenzaron a fusionarse para formar átomos de helio. Esta fusión nuclear, similar a la que se produce en una bomba de hidrógeno, provocó el encendido del Sol.

El Sol se encendió, pero sólo en su interior, había miles de kilómetros de distancia hasta su superficie, por eso la explosión nuclear se extendió por todo el interior del Sol pero la presión del gas que tenía encima impedía que la explosión alcanzara la superficie, y mientras tanto la suma de la presión gravitatoria desde fuera y la presión explosiva desde dentro del Sol mantuvieron encendida la llama atómica aunque la superficie del Sol siguió siendo una superficie apagada.

Seguramente hicieron falta varios siglos para que la llama atómica alcanzara la superficie haciendo que por primera vez la luz solar iluminase el interior del sistema solar. Lo que se podría haber visto en ese momento no era más que una niebla blanquecina, una nebulosa de polvo y gases con leves trazas de átomos más pesados. A través de esa niebla hubiera sido imposible vislumbrar los planetesimales, planetas y satélites que se habían formado, pero todos ellos estaban allí, aún formándose y constantemente bombardeados por los millones de fragmentos que aún quedaban como restos de la gran cantidad de planetesimales que

no habían conseguido formar planetas o planetas que habían sido desintegrados por las catástrofes planetarias que se habían producido.

A medida que la llama atómica atravesaba el manto solar, su avance iba siendo cada vez más rápido al soportar cada vez menos presión. Cuando por fin llegó a la superficie la explosión pudo encontrar una salida a su propia presión interior expulsando ingentes cantidades de partículas, átomos y gases más allá de la superficie solar.

La fuerza gravitatoria del sol era tan grande que los gases más pesados no conseguían escapar pero la presión del horno nuclear empujaba constantemente a las partículas y átomos más ligeros empujándolos incesantemente lejos del Sol.

Estas partículas que se "derramaban" desde el Sol, empujadas por su propia radiación interna, formaron un "Viento Solar" que barrió el sistema empujando las partículas ligeras que encontraba en su camino.

Si un hipotético observador hubiese estado en aquel momento contemplando el proceso desde una distancia de un par de días luz sobre el plano de la elíptica, podría haber sido testigo de lo siguiente:

Al principio sólo habría visto una nube oscura que ocultaba el fondo estelar. Sería el único indicio de que allí había "algo". De vez en cuando podría ser testigo de pequeños destellos producidos por el choque de meteoritos al caer en la atmósfera de algún planetesimal. Desde el centro de la nube, de repente, llegaría algún destello más brillante. Ese destello desaparecería y volvería a aparecer varias veces durante varios años hasta que al final se hiciera mucho más fuerte encendiendo toda la superficie del Sol. El Sistema Solar se vería entonces como una nebulosa muy similar en su forma a una galaxia aun-que de un tamaño más reducido. Aún a través de esta nebulosa resultaría imposible ver los planetas, pero sí sería posible ver remolinos en las nubes entre los que podríamos reconocer los remolinos generados por Júpiter y Saturno. Los remolinos correspondientes a los planetas más pequeños serían mucho más difíciles de ver.

Al cabo de algunos años veríamos el primer cambio, cuando a través del centro del Sistema veamos una estrella gigantesca, el Sol. Antes

sólo habíamos visto su resplandor, pero ahora podremos ver directamente el brillo de su superficie. A su alrededor veremos un anillo brillante, el frente de empuje del viento solar al ir barriendo la nebulosa. Al aumentar el tamaño de ese anillo, a través de su interior podremos ver por primera vez las estrellas que hay al otro lado, hasta ahora la nebulosa nos había impedido verlas. Como los planetas. Pero a medida que el frente del viento solar se vaya alejando irán quedando detrás los planetas interiores, Mercurio, Venus, La Tierra con su gigantesco satélite, Marte. El frente seguirá creciendo hasta dejar a la vista los planetas gigantes, Júpiter y Saturno, y los exteriores, Urano y Neptuno.

En ese primer barrido el viento solar habrá empujado hacia el exterior casi todas las partículas, átomos y moléculas ligeras que no estuviesen dentro de ningún planeta. Las partículas más pesadas serían barridas a lo largo de los más de cuatro mil millones de años transcurridos desde entonces, y todas esas partículas han ido a formar una nube a billones de kilómetros de distancia del Sol. Esta nube rodea el sistema solar como un anillo de polvo y en él también se han formado remolinos y se han creado cuerpos más o menos masivos y alguna vez que otra uno de estos cuerpos es desviado de su órbita por otro cuerpo similar y cae hacia el Sol en una órbita sumamente excéntrica. Formados en su mayor parte por los mismos elementos que había en el origen de nuestro sistema, esas bolas de "hielo sucio" atravesarán el firmamento formando lo que desde la antigüedad se han dado en llamar cometas.

Pero la consecuencia más importante que tuvo el encendido del Sol fue la limpieza del sistema solar. El viento solar barrió todo el polvo que frenaba las órbitas de los planetas y debido a ello los planetas existentes en ese momento han dejado de ser frenados para caer hacia el centro del sistema. Al contrario, el efecto gravitatorio que se produce entre los diversos planetas y satélites ha hecho que en algunos casos las distancias orbitales aumenten en lugar de disminuir. Así es el caso de la Luna con respecto a la Tierra. Estando ya en una situación muy cercana a que ambos cuerpos chocasen entre sí, la des-aparición del polvo interplanetario frenó esa caída, y desde entonces la distancia de la Tierra a la Luna ha ido aumentando apreciablemente.

## La formación de los Planetas

Los planetesimales eran nubes de gases que se aglomeraban debido a su propia fuerza gravitatoria. El gas que los formaba contenía todos los elementos estables del universo aproximadamente en la misma proporción en que esos elementos existen hoy en día, es decir, un 92% de Hidrógeno, 7% de Helio y un 1% de los demás elementos.

De este 1%, había aproximadamente un 50% de oxígeno, 20% de Neón, 15% de Nitrógeno, 8% de Carbono, 2% de Silicio, 2% de Magnesio, 1,5% de Hierro, 1% de Azufre, y el 0,5% restante era una mezcla de Argón, Aluminio, Calcio, Sodio, Níquel, Fósforo y demás elementos en proporciones cada vez menores.

Sin embargo, a pesar de suponer un porcentaje tan reducido, la masa total de cada uno de los planetesimales era tan grande que la cantidad de Níquel o Fósforo, por ejemplo, en cada uno de ellos era gigantesca, capaz de formar una esfera de centenares de kilómetros de radio.

El calor y la presión provocaron diversas reacciones químicas que propiciaron la formación de moléculas y compuestos químicos. El hidrógeno, altamente reactivo y superabundante en aquella nube, se unía a diversos átomos, especialmente a los más abundantes (Oxígeno, Carbono y Nitrógeno) para formar gases como vapor de agua, metano y amoníaco. El Helio y el Neón, al ser muy poco reactivos, se conservaban como gases aislados. El Silicio reaccionaba con el oxígeno y posteriormente con otros elementos para formar todo tipo de silicatos. El Hierro reaccionaba con el azufre dando lugar a todo tipo de sulfuros.

Debido a la fuerza gravitatoria los materiales más pesados, principalmente el Hierro y el Níquel, tendían a hundirse hacia el interior de la nube mientras que los más ligeros permanecían en la superficie. Así se formaron las primeras capas que forman el interior de nuestro planeta, un núcleo de Hierro y Níquel seguido de un manto de Silicatos. Sobre todo ello una corteza más o menos sólida de silicatos y por encima una atmósfera de vapor de agua, amoníaco y metano. Era la atmósfera I.

Aproximadamente por esa época fue cuando el Sol se encendió. Conforme el sistema solar iba quedando cada vez más despejado de polvo, el calor del Sol empezó a afectar a los planetas que giraban a su alrededor. Al calentarse las capas altas de la atmósfera se producía una disociación de las moléculas de vapor de agua, separándose en sus componentes, Oxígeno e Hidrógeno. El Hidrógeno libre era muy ligero, y más al calentarse, por lo que tendía a ascender sobre la atmósfera y a determinada distancia podía escapar del campo gravitatorio terrestre siendo arrastrado por el viento solar hacia más allá del sistema solar.

El oxígeno libre reaccionaba con el amoníaco y el metano para formar Nitrógeno, Dióxido de Carbono y agua, y con este agua volvía a repetirse el ciclo una vez tras otra. El final de este proceso, de repetirse un número indefinido de veces, era la desaparición de toda el agua y el Hidrógeno quedando entonces una atmósfera II, compuesta exclusivamente de Nitrógeno y Dióxido de Carbono.

En Mercurio, demasiado pequeño y excesivamente cerca del Sol esta reacción se produjo muy rápido acabando en pocos millones de años con toda la atmósfera del planeta. Aunque mucho más lejos, el reducido tamaño de Marte también hizo que desapareciera gran parte de su atmósfera quedando hoy en día apenas leves trazas de una atmósfera muy tenue de Nitrógeno y Dióxido de Carbono. Venus y la Tierra son lo bastante grandes como para que el Hidrógeno no se pierda con tanta rapidez en el espacio, y entonces se ha producido otro fenómeno que no se había producido en los planetas más pequeños.

Cuando los rayos UV (ultravioleta) disociaban las moléculas de agua, los átomos de Hidrógeno ascendían sobre la atmósfera para perderse en el espacio, y los de Oxígeno descendían para repetir el ciclo que conduciría a una nueva atmósfera. Pero mientras permanecía como Oxígeno libre, algunas moléculas eran bombardeadas por rayos UV formándose moléculas de Ozono. El Ozono era más ligero que la atmósfera, por eso formaba una capa sobre ella.

Pero más importante, el Ozono NO DEJABA PASAR los rayos UV, es decir que cuando se formaba la capa de Ozono el proceso de disociación del agua se detenía. Por desgracia la capa de Ozono se mantenía a



una muy elevada altitud, más de veinte kilómetros, y seguía siendo bombardeada por rayos UV. Muchas moléculas de ozono, al ser bombardeadas, podían adquirir suficiente velocidad como para escapar de la atracción planetaria, y eso hacía que al cabo del tiempo la capa de Ozono se debilitaba, volvía a dejar pasar los rayos UV y se volvía a repetir el proceso. Pero al menos la disociación del agua había resultado mucho más lenta que sin la capa de Ozono.

Al ser Venus algo más pequeña que la Tierra y al estar situada mucho más cerca del Sol, su capa de Ozono no pudo impedir que a la larga desapareciera todo el hidrógeno de su atmósfera convirtiéndose ésta en una muestra más de atmósfera II, compuesta de Nitrógeno y Dióxido de Carbono.

Mientras tanto, los planetas gigantes se encontraban en la situación opuesta. Por un lado estaban tan lejos del Sol que los rayos UV apenas alcanzaban a disociar una mínima cantidad de moléculas de agua. La temperatura transmitida por el Sol era apenas suficiente para calentar los gases, al contrario, debido a sus propios procesos internos el mismo Júpiter genera más calor que el que recibe del Sol. Y por último, la masa de Júpiter es tan grande y a esa distancia el viento solar tan débil, que ni siquiera el Hidrógeno consigue escapar con facilidad de su campo gravitatorio, por lo que la conversión de atmósfera I en atmósfera II aún está en sus inicios.

Sin embargo el proceso en la Tierra ha seguido un camino diferente. Al principio, tal como en los demás planetas del sistema solar, se produjo una atmósfera de Vapor de Agua, Amoníaco y Metano. También como en los demás planetas comenzó la transformación de esa atmósfera en otra de Nitrógeno y Dióxido de Carbono. Pero hoy en día gozamos de una saludable atmósfera de Nitrógeno, Oxígeno y Vapor de Agua, con algunas trazas de otros gases como Argón o Dióxido de Carbono.

¿Cómo se ha generado esta atmósfera? Volveremos a ello un poco más tarde, pero antes debemos examinar otro proceso.

## **El origen de la corteza terrestre**

En todo sistema cerrado la tendencia natural de la materia es el desorden. Esto es algo que observamos continuamente, si dejamos un coche abandonado junto a la carretera al cabo de algunos años estará oxidado, los cristales estarán rotos, los asientos carcomidos, los neumáticos destrozados. Si dejamos un libro sobre la mesa al cabo de algunos siglos solo quedará un pequeño montón de polvo. Si lo que dejamos es una manzana, no quedará nada en pocas semanas.

A escala atómica ocurre lo mismo: donde hay moléculas complejas tarde o temprano estas moléculas se desorganizan, se parten en componentes más pequeños, donde había vida, ésta muere, donde había organización ésta desaparece. Esto es lo que ocurre en los sistemas cerrados. Afortunadamente la Tierra no es un sistema cerrado.

Debido a que no es un sistema cerrado la superficie terrestre ha sido bombardeada durante millones de años por millones de meteoritos que han aumentado su tamaño al mismo tiempo que su caída producía suficiente calor como para que toda la masa del planeta se fundiese. Este calor ha ocasionado que los elementos constitutivos del planeta se combinasen entre sí para formar los compuestos y aleaciones, sulfuros y silicatos que conforman las capas de nuestro planeta. De una estructura caótica que había al principio, los compuestos que tenían un punto de fusión similar se separaban del resto de la masa terrestre para formar vetas de minerales más o menos homogéneos. Sometida a sucesivos procesos de fusión y enfriamiento, presión y compresión, acreción y convección, cada uno de estos procesos empujaba determinados elementos en ciertas direcciones hasta conseguir que de aquel caos inicial surgiera una cierta estructura.

La estructura que todos estos procesos nos han dejado es la de un planeta dividido en capas. En la capa más interior hay un núcleo con los elementos más pesados, siendo los más abundantes el hierro y el níquel. A continuación un manto de silicatos a temperatura de fusión. Por encima de este manto la atmósfera primigenia.

Conforme iban quedando cada vez menos fragmentos sólidos en la nebulosa solar, disminuyó el bombardeo de meteoritos, de ahí que la capa

externa del manto comenzara a enfriarse y solidificarse. Sobre la superficie del manto fundido se formó una costra sólida que era rota continuamente por la caída de los aún frecuentes meteoritos. Tal como hoy en día los océanos se mantienen en movimiento, el manto semilíquido de aquella época también lo hacía y al formarse una costra en su superficie ésta se desplazaba en la dirección en que la empujaran las corrientes del manto.

Con el tiempo la corteza adquirió un grosor de varios kilómetros, pero aún seguía siendo una fina corteza flotando sobre el manto terrestre y arrastrada por las corrientes magmáticas. En ocasiones, fragmentos de esa corteza chocaban entre sí y donde se producían esos choques ocurría como con una tela empapada flotando sobre el agua: los bordes de esas placas se arrugaban formando elevadas cordilleras, o se montaban una placas sobre otras generando extensas mesetas.

En algunas zonas dos placas contiguas podían alejarse dejando al descubierto el manto fundido del interior de la Tierra, y en otras ocasiones dos placas podían deslizarse la una junto a la otra en direcciones contrarias provocando periódicos terremotos.

Todo este continuo movimiento provocaba gigantescas presiones en el interior de la corteza terrestre y en ocasiones se producían erupciones volcánicas que sacaban al exterior materias que quizás llevaban millones de años enterradas.

De esta forma tan caótica se formaron los principales yacimientos mineros, los nódulos de diamantes, las vetas de uranio, las menas de plata y mercurio. Los gases de la atmósfera primigenia reaccionaban con todos estos elementos para formar numerosos compuestos que se depositaban en la superficie para posteriormente formar parte de una corteza terrestre cada vez más compleja.

Y cuando la temperatura de la superficie terrestre lo permitía, el vapor de agua de la atmósfera se condensaba para formar los primeros lagos, lagos que sólo se daban en lugares elevados, cordilleras, cráteres de volcanes apagados, lugares que estaban sobre una corteza terrestre lo suficientemente gruesa como para mantenerse alejada del calor del manto terrestre, porque en los lugares bajos, donde hoy están los océa-

nos, la corteza terrestre era sumamente delgada y estaba demasiado caliente a causa del calor interior del planeta para que en ella pudiese permanecer el agua en estado líquido.

En esos lagos de montaña, calientes hasta el punto de hervir en ocasiones, inundados de sales minerales y acariciados por una ardiente brisa de hidrógeno, amoníaco y metano, se producían numerosas reacciones químicas que dieron los primeros pasos hacia la vida.

## **El Origen de la Vida**

En los primeros lagos que se formaron en la superficie terrestre había numerosas sales minerales, magnesio, azufre, hierro. El agua estaba a unas temperaturas muy elevadas y sobre ella había una ardiente masa de aire formada por metano y amoníaco. Todo esto ocurría en la más completa oscuridad, el Sol aún no había entrado en ignición y la nebulosa solar impedía que se viera el más mínimo destello de luz estelar. Pero a pesar de estas condiciones tan adversas, el aporte energético era tan grande que las moléculas se agrupaban en estructuras complejas.

Había dos fuentes de energía principales, una era el calor interno de la Tierra, la otra era la frecuente, casi continua formación de tormentas eléctricas. Estas dos fuentes de energía hacían reaccionar unos átomos con otros, unas moléculas con otras. El calor y los rayos creaban moléculas complejas. Y también las destruían.

La energía podía disociar moléculas de metano o amoníaco, y éstas volvían a asociarse con las piezas que se encontrasen más a mano. La mayor parte de las veces se formaban combinaciones bastante inestables, pero en ocasiones, por azar, se formaban combinaciones más estables.

Así, el azar iba generando compuestos, algunos más simples, otros más complejos. Las moléculas complejas eran capaces de almacenar más energía que las simples, y como la energía abundaba, esto hizo que la complejidad del caldo primigenio fuera también en aumento.

En muy poco tiempo el caldo primigenio que formaba esos lagos estuvo lleno de compuestos como formaldehído, ácidos fórmico, acético y láctico, urea y hasta algunos aminoácidos simples como glicina y alanina.

Una vez realizado este proceso el caldo primigenio había dado lugar a un caldo más elaborado, como si a partir de una mezcla de agua, grava y arena se hubiesen formado ladrillos. Con piezas más complejas, las combinaciones aumentaban su complejidad y a partir de estos "ladrillos" se construyeron piezas más complejas, entre ellas algunas purinas como la adenina y azúcares como la ribosa y la desoxirribosa, componentes de los ácidos nucleicos.

El lago ya contenía sustancias de una gran complejidad, y aunque seguían existiendo moléculas simples la mayor parte de las moléculas que se encontraban en ese caldo eran moléculas más complejas, capaces de almacenar gran cantidad de energía química.

Conforme aumentaba la complejidad del caldo aumentaba también la probabilidad de que se formasen sustancias más complejas. Así, cuando el caldo estaba saturado de ácidos nucleicos, purinas y azúcares, resultó inevitable que de esta mezcla surgiesen los primeros nucleótidos e incluso algunos compuestos tan complejos como el trifosfato de adenosina (ATP), uno de los componentes fundamentales de la vida.

Al hablar de azar no tenemos más remedio que hablar de probabilidades. ¿Qué probabilidad había de que surgiese de forma espontánea un compuesto tan complejo como el ATP? Si tuviésemos que partir exclusivamente de los elementos que se encontraban en la atmósfera primigenia, la probabilidad de que se formase ATP resultaría tan baja que sería absurdo siquiera considerarla. Podrían pasar mil veces la edad del sistema solar y aún podríamos estar esperando que se formase ATP a partir de agua, metano, amoníaco y las escasas sales que existían en el caldo primigenio.

Pero de este caldo primigenio no surgió el ATP, sino un nuevo caldo más complejo que el anterior, en el cual surgieron moléculas más complejas que aumentaron la complejidad del caldo en un ciclo que se retroalimentaba a sí mismo hasta hacer inevitable la formación de ATP.

De hecho, todo lo expuesto hasta ahora no son más que los pasos lógicos que debió dar la naturaleza y que los científicos del último siglo han intentado ¡y conseguido! reproducir paso a paso.

En 1953, Urey y Miller prepararon una mezcla de amoníaco, metano e hidrógeno por la que hicieron pasar un serpentín con vapor de agua. Dentro del recipiente un electrodo generaba una chispa eléctrica que atravesaba el gas. Una semana más tarde analizaron la muestra y encontraron ácidos fórmico, acético, glicólico y láctico, ácido cianhídrico, urea y dos aminoácidos, glicina y alanina. Las cantidades de estas sustancias generadas no eran pequeñas, sino grandes, tanto que sólo al cabo de 24 horas el caldo, originalmente transparente, había adquirido un fuerte color rosa y al final del experimento un intenso color rojo amarronado.

El experimento fue repetido por varios científicos con diversas variaciones a lo largo de varios años, sustituyendo algunos componentes originales y usando luz ultravioleta en lugar del electrodo y en todas las ocasiones se produjeron sustancias complejas y hasta algunos aminoácidos más complejos que la glicina y la alanina que consiguieron Urey y Miller.

En 1961 Juan Oró, en la Universidad de Houston, añadió ácido cianhídrico al caldo primigenio y del proceso obtuvo algunas purinas, entre ellas la adenina.

En un experimento posterior, en 1962, añadió formaldehído a la mezcla original y consiguió la síntesis de dos azúcares distintos, la ribosa y la desoxirribosa, componentes de los ácidos nucleicos.

Desde 1963 hasta 1965, en el centro de investigación Ames de California se realizaron una serie de experimentos partiendo de compuestos que ya habían sido creados en experimentos anteriores, como la ribosa, la adenina, fosfatos y otros, y sometiéndolos a iluminación con luz UV. De estos experimentos surgieron compuestos cada vez más complejos, como adenosina, ácido adenílico y trifosfato de adenosina (ATP).

Vemos pues que el proceso por el cual los mares primigenios fueron adquiriendo complejidad no son simples teorías, sino que han sido comprobados por los experimentos de muchos científicos modernos.

Ahora bien, todas estas sustancias siguen siendo simples moléculas, incapaces de equipararse a la complejidad de una simple célula viva. Pero es que la complejidad del caldo primigenio no se detuvo allí, sino que siguió aumentando durante millones de años creando combinaciones cada vez más complejas y más capaces de procesar grandes cantidades de energía.

El proceso no era fácil, aún estamos hablando de lagos en zonas elevadas del planeta, los únicos lugares donde el agua podía permanecer en estado líquido. Sin embargo el planeta seguía a oscuras, y seguía bombardeado por meteoritos y asolados por terremotos. Los lagos se formaban, pero también se destruían y en ocasiones, todas las sustancias complejas que hubiesen podido formarse en uno de aquellos lagos podían desaparecer para siempre sin dejar rastros de su existencia. Pero los experimentos, las reacciones químicas, se seguían produciendo en muchos lugares del planeta.

Poco a poco la corteza terrestre se fue enfriando y en algunos sitios surgieron los primeros mares permanentes. También por esa época fue cuando el sol se encendió y el viento solar barrió el sistema eliminando la nebulosa original.

Al ocurrir ésto se produjeron varios fenómenos, en primer lugar la luz del sol comenzó a transformar la atmósfera de metano, hidrógeno y amoníaco en una nueva atmósfera de nitrógeno y dióxido de carbono. Al mismo tiempo apareció una nueva fuente de energía, el Sol, cuyos rayos UV supusieron un enorme incremento en la cantidad de energía disponible en la superficie del planeta. Y esto llevó directamente a que en los mares primigenios aumentara portentosamente el número de experimentos químicos capaces de producir sustancias necesarias para la formación de la vida.

Cada vez que de uno de estos experimentos surgía una molécula capaz de procesar la energía con más eficiencia que sus antecesoras, esta nueva molécula pasaba a formar parte sustancial del caldo prebiótico, re-

emplazando a alguna de las moléculas menos eficientes. Cada vez con componentes más complejos, el proceso se repitió durante millones de años de experimentos hasta formar moléculas compuestas de ácidos nucleicos y proteínas lo suficientemente complejas como para ser capaz de usar la energía de su entorno en crear una copia de sí misma.

Así, la primera molécula capaz de autoreplicarse (pero aún no un ser vivo) inició un proceso evolutivo que en pocos cientos de millones de años pobló el fondo de los mares de las más diversas formas de vida.

## **El Origen de la Vida**

Hace cuatro mil millones de años la Tierra era una bola incandescente con la superficie apenas cubierta por una leve costra continuamente destrozada por la frecuente caída de los meteoritos que en aquella época aún poblaban el sistema solar.

Ninguna forma de vida actual hubiera sido capaz de sobrevivir en su superficie, pero en aquel caos continuo provocado por constantes erupciones volcánicas, géiseres y bombardeo de meteoritos y rayos cósmicos, se encontraban presentes todos los elementos necesarios para la vida.

En los lugares donde la corteza terrestre había tenido tiempo de solidificarse y enfriarse algo se podían llegar a producir precipitaciones de lluvia formando charcas y lagos de un líquido que no era agua precisamente, sino una mezcla de agua, amoníaco, metano, ácidos y sales en suspensión. Más adelante se unieron a esta atmósfera gases como monóxido y dióxido de carbono y nitrógeno.

Todo ello, con el continuo aporte de energía por parte del sol y la temperatura interna del planeta, producía reacciones químicas que generaban moléculas de un cierto grado de complejidad como formaldehído, ácido prúsico, glicinas y alcoholes. También se formaban otras muchas sustancias complejas pero en mucha menor proporción, y con el tiempo la atmósfera primitiva contuvo ingentes cantidades de moléculas complejas.



Poco después ya no teníamos un caldo de átomos, sino un caldo de moléculas de bastante complejidad. Los sucesivos hervores, las erupciones volcánicas, las descargas eléctricas de los rayos bombardeando ese caldo de moléculas hizo que de vez en cuando muchas de estas moléculas fueran destruidas pero también hizo que se formaran, por azar, algunas moléculas más complejas.

El aporte energético era tan grande que las sustancias simples tendían a reagruparse con tanta o más rapidez que las complejas en destruirse, por eso a lo largo de millones de años el caldo fue conteniendo cada vez una mayor proporción de sustancias complejas.

El azar producía nuevas moléculas, millones de combinaciones cada día en todo el planeta, las moléculas más inestables eran destruidas con rapidez, las más estables perduraban por más tiempo, las más simples eran usadas en nuevos experimentos, uno tras otro, día tras día, año tras año, milenio tras milenio. Pero por muy complejas que fueran esas moléculas seguían siendo moléculas inertes, hubieron de pasar cientos de millones de años de experimentos para que por azar surgiera una molécula capaz de autoreplicarse.

Durante casi mil millones de años se había preparado un complejo caldo de cultivo y en ese caldo aquella primera molécula autoreplicante tuvo alimento y energía suficientes para reproducirse durante cientos de generaciones, hasta cubrir la totalidad de la extensión de los mares.

Ahora teníamos una molécula capaz de tomar otras moléculas más pequeñas de su entorno para autoreplicarse. Apenas necesitó unos cientos de generaciones, quizás menos de un mes, para extenderse por todas las zonas del planeta donde pudiera encontrar alimento y energía. Fue la primera explosión demográfica del planeta y continuó hasta que fueron tantas moléculas que se hizo difícil encontrar alimento para todas ellas.

Cuando esto ocurrió ya eran trillones las moléculas idénticas que se habían formado. Pero la autoreplicación no siempre se producía en condiciones adecuadas. A veces faltaba algún alimento, alguna sustancia necesaria para la replicación y eso hacía que fallara. Los componentes de aquel fracaso servían de alimento para otras replicaciones, al fin

y al cabo eran trillones. Algunas veces el error que se producía no suponía la destrucción de la molécula, ésta era capaz de reproducirse en las mismas condiciones que su progenitora aunque una sutil diferencia podía representar una ligera ventaja o desventaja con respecto a las demás moléculas de su entorno.

Eran trillones de moléculas en todo el mundo intentando reproducirse dos o tres veces al día. Casi todas esas replicaciones eran correctas, pero había fallos, quizás una de cada mil replicaciones. De esos fallos la mayor parte eran inviables pero unos pocos, quizás uno cada cien millones de errores, provocaban una molécula que también era capaz de autoreplicarse. Pero era una molécula distinta, no mejor ni peor, pero en determinadas condiciones podía ser más fuerte, más estable, o más capaz de replicarse sin errores.

Cuando una molécula tenía una cierta ventaja tendía a reproducirse más, por eso las moléculas que aprovechaban mejor alguna característica de su entorno, que eran más fuertes o estables, o que se reproducían con más eficiencia acababan sustituyendo a las más simples y frágiles. Así fue como comenzó la evolución de las especies, aunque sólo había una única molécula (aún no ser vivo) evolucionando.

Millones, billones, trillones de experimentos más tarde, surgió una molécula capaz de rodearse de una membrana dando lugar a la primera célula procariota. Anteriormente ya habían surgido por azar moléculas que se rodeaban de una membrana. Pero la composición de esa membrana era demasiado fuerte, demasiado impermeable, demasiado frágil o demasiado lo que sea para que resultara útil. Aquellos experimentos fracasaron.

Cuando uno de aquellos trillones de experimentos tuvo éxito apareció la primera célula procariota de la historia, más parecida a una bacteria que a una célula de las que componen nuestros cuerpos, pero ya un ser vivo capaz de reaccionar a su entorno, protegerse de condiciones adversas, alimentarse y reproducirse.

Mucho más capaz que las moléculas autoreplicantes que poblaban el planeta, la primera célula procariota se reprodujo una y otra vez produciendo la segunda explosión demo-gráfica de la historia.

La expansión de la vida no eliminó a las moléculas autoreplicantes, aún hoy en día siguen existiendo como virus y otras formas prebióticas, pero el planeta ya no era de las moléculas, sino de las células.

Seguían siendo células procariotas, es decir, simple material genético envuelto en una membrana, tal como lo que hoy en día es el núcleo de una célula. Pero su grado de complejidad produjo dos efectos contrapuestos. Por un lado la célula era tan compleja que distintas partes de la molécula actuaban en condiciones diferentes lo que hacía que fuera más adaptable a su entorno. Por otro su complejidad producía errores de replicación con más frecuencia que en el caso de las moléculas. La mayor parte de estos fallos provocaban la destrucción de la célula, pero otros fallos suponían pequeños cambios en su diseño. A veces ese cambio suponía una ventaja, otras veces era un cambio perjudicial y en ocasiones era totalmente neutro. Con el tiempo llegó a haber muchas versiones diferentes de la célula original, cada una con diferentes probabilidades de supervivencia en diferentes entornos.

En aquella época había millones de hábitats posibles, algunas células eran más capaces de sobrevivir en unos que en otros lo cual llevó a la primera especialización de la vida, distintos hábitats y distintas células pintando los colores del primer cuadro de la vida en la Tierra.

Había células capaces de tomar determinados compuestos y convertirlos en aminoácidos. Otras podían usar la energía del sol para fabricar azúcares. Otras células, en fin, podían ensamblar los aminoácidos para fabricar proteínas.

La actividad de cada célula era inconsciente y caótica, pero lo que hacía cada una era dirigirse a los lugares donde podía sobrevivir mejor. Los desechos de unas podían servir de alimento a las otras, era inevitable que al cabo de poco tiempo surgieran agrupaciones de dos o más células procariotas para formar una colonia con mayores posibilidad de supervivencia que las que tenían cada una por separado.

Se formaron miles, millones de colonias, billones de experimentos condenados a fracasar. Pero entre todos aquellos fracasos algunas de esas colonias llegaron a encerrarse en una nueva membrana dando lugar a las primeras células eucariotas.

De toda aquella producción de células extrañas e inviables, las que no tenían posibilidades de supervivencia eran destruidas de inmediato, pero de vez en cuando surgía una combinación que tenía más posibilidades de supervivencia que sus congéneres. Estas células competían con ventaja contra sus antecesoras más simples y en pocas generaciones eran capaces de acabar con su anterior supremacía.

La reproducción de aquellas primeras células seguía siendo delicada y se producían errores con bastante frecuencia. A veces unos componentes de la célula empezaban a replicarse antes que otros, lo que llevaba a la destrucción de la misma. Otras veces la célula mezclaba los cromosomas de distintos componentes de la célula y de ello salía algo totalmente distinto, una mutación. Casi siempre las mutaciones llevaban a la destrucción de las células pero algunas mutaciones eran capaces de seguir sobreviviendo y hasta de reproducirse generando una variedad diferente de la célula original. A veces se producían mutaciones beneficiosas, y eso hizo que las células descendientes fueran más capaces de sobrevivir que sus antecesoras.

Con el tiempo se formaron células muy complejas, algunas de tamaños inusitados para nuestra experiencia, se han encontrado células fosilizadas que podían medirse ¡en centímetros!. La vida había estallado.

### **¿Qué probabilidades hay de que ocurra esto?**

Se ha dicho que la probabilidad de que del caldo primigenio surgiera una célula es algo tan remoto que resultaría absurdo siquiera imaginarlo. Y es cierto, lo que ocurre es que del caldo primigenio no surgió ninguna célula sino que se produjo una evolución paso a paso, escalón a escalón desde el cieno primordial hasta la célula pero pasando por diversos pasos intermedios.

Estos pasos eran claros, de un primer caldo primigenio surgió un segundo caldo más complejo. Y eso era inevitable, ahí no contaba para nada el azar. En aquel segundo caldo se formaron moléculas cada vez más complejas. También esto era inevitable.

Apareció la primera molécula autoreplicante. Aquí nos encontramos por primera vez con el azar. Puesto que no queda ningún registro fósil no sabemos cómo sería aquella primera molécula. Sí sabemos que sería sumamente compleja pero mucho menos que un virus. La probabilidad de que esta molécula surgiera del caldo primigenio original era muy escasa. Hubiera sido más probable que surgiera del caldo primigenio que existió unos doscientos millones de años más tarde, pero muy poco más.

Pero mientras más complejas eran las moléculas que albergaban los mares la aparición de dicha molécula era cada vez más probable. Podría haber tardado más o menos cientos de millones de años de experimentos químicos pero tarde o temprano la complejidad del caldo primigenio haría que la aparición de una molécula autoreplicante fuera un suceso casi seguro.

Una vez aparecida la primera molécula autoreplicante, y alimentada por el complejo caldo primigenio, era inevitable que se reprodujese hasta habitar en todos los rincones de la Tierra. También que se encontrase con diversas condiciones medioambientales y que se produjesen errores en la replicación, dando lugar a una casi infinita variedad de moléculas, cada una con ciertas ventajas en determinados ambientes, cada una intentando encontrar una parcela que invadir.

Los siguientes pasos resultan tan inevitables como los anteriores, aunque la probabilidad de producir la primera célula eucariota desde ese punto era muy baja, la evolución se produjo paso a paso, haciendo que cada millón de años hubiese algas y bacterias cada vez más complejas. Mientras más tiempo pasaba, más aumentaba la probabilidad de que aparecieran las células, hasta que llegó un momento en que la aparición de la primera célula era casi inevitable.

En ocasiones se ha dicho que la aparición de la vida en la Tierra es algo tan improbable como que un mono al teclado de una máquina de escribir y pulsando las teclas al azar pudiera escribir las obras completas de Shakespeare.

Intentemos algo más simple: intentemos que un mono escriba la frase: "el hombre desciende del mono".

Si tuviera que hacerlo al azar nos encontraríamos con una imposibilidad manifiesta: la frase citada tiene veinticuatro letras, para cada una de ellas existen veintiseis posibilidades lo que dará  $26^{24}$  combinaciones distintas, más o menos nueve mil quintillones. Si el mono escribiese una tecla por segundo necesitaría trillones de veces la edad del universo para escribir todas las combinaciones.

Ahora bien, un mono puede aprender y si la máquina de escribir tiene un dispositivo que enciende una luz verde cuando el mono pulsa las letras correctas y una roja cuando pulsa letras que no forman parte de la frase, el mono puede aprender a evitar la 'a', la 'u' y las demás consonantes que no forman parte de la frase. Quedan pues las letras 'el-hombrdscin', doce letras. Si el mono aprende a evitar las demás teclas, cosa que a nuestro mono le podría llevar unas cuantas horas, las combinaciones posibles serán  $12^{24}$ , unos ochenta cuatrillones de combinaciones.

Hemos avanzado algo, pero aún no lo suficiente. Dividamos ahora la frase en sílabas de dos o tres letras: "el hom-bre des-ci-en-de del mo-no". Cada vez que el mono escriba una de esas sílabas pulsaremos la luz verde, si escribe cualquier otra, una roja. Hay  $12^3$  (menos de dos mil) combinaciones posibles, en aproximadamente unas dos o tres horas el mono las habrá probado todas y ya sabrá cuáles son las diez sílabas correctas.

La probabilidad de que el mono, escribiendo únicamente estas sílabas, llegue a escribir la frase completa es de una entre diez mil millones. Conseguir que el mono escriba esa única combinación al azar requeriría unos pocos siglos, pero no vamos a esperar tanto. Lo que tenemos que hacer ahora es dividir la frase en cuatro partes: "el hombre-desci-ende-del mono". Tras probar las mil combinaciones posibles de tres sílabas, le habremos indicado al mono cuáles son las correctas. Y teniendo cuatro fragmentos de la frase, la probabilidad de teclearlas en el orden exacto es de una entre 256.

Si el mono es bastante aplicado, el proceso podría haberle ocupado durante dos o tres días.

## **El Origen de la Célula :**

¿Cómo se originaron las células?

Uno de los rompecabezas más complicados del origen de la vida es cómo se formaron las primeras células y su metabolismo.

Pudiera pensarse que las primeras células fueran como los organismos más pequeños y simples que viven hoy en día, los microbios conocidos como micoplasmas.

Las células de los micoplasmas son realmente diminutas, más de mil millones de veces menores que un protozoo, y albergan tan sólo una fracción del ADN y de las proteínas normalmente presentes en una célula.

Pero todos los micoplasmas son parásitos, versiones menores y simplificadas de microorganismos mayores de vida libre, y sólo pueden crecer y reproducirse en el interior de otras células, por lo general de mamíferos, un modo de vida claramente imposible para las primeras formas de vida.

Las bacterias comunes ofrecen un modelo alternativo, pero los microbios de vida libre son demasiado complejos, compuestos de cientos de polímeros diferentes (entre ellos, unos quinientos tipos de ARN), más de un millar de enzimas y decenas de miles de moléculas.

Las primeras células debieron ser considerablemente más simples. Para conocer cómo eran las primeras células es necesario levantar el velo evolutivo que separa la vida actual de sus principios. Esta tarea apenas ha comenzado.

Los avances en la comprensión de la historia temprana de la vida sólo se producen progresivamente, así que hasta que no se disponga de un modelo del origen de los monómeros y los polímeros parecería ocioso atacar esta compleja cuestión.

Pero aunque apenas se conozca nada con certeza acerca del origen de la vida celular, sí está claro que ocurrió según una secuencia de tres estadios:

Es probable que ya existieran sistemas químicos que la mayoría de científicos describirían como vivos antes de que fueran empaquetados en células. La evidencia fósil de este estadio precelular pudiera no llegar a descubrirse nunca, puesto que su composición química sería demasiado frágil para conservarse, pero se cree que durante un cierto periodo la Tierra primitiva estuvo poblada por moléculas vivas, «genes desnudos primordiales» de ácidos nucleicos capaces de autorreproducirse.

A causa de su composición química, estos y otros compuestos orgánicos del caldo primordial habrían acabado por agregarse en diminutos lóbulos protocelulares, ancestros potenciales de células con pared celular. Las pruebas empíricas de este estadio parecen haberse evadido también de la historia, si bien es posible que algún día se hallen células fósiles más antiguas que las más antiguas conocidas en la actualidad.

Las primeras células estarían impulsadas por una forma sencilla de metabolismo que estableció las bases para la evolución posterior de una maquinaria metabólica más compleja. Consideremos cada uno de estos estadios por separado.

### **El problema de la gallina y el huevo**

La vida puede multiplicarse solamente si la información química almacenada en los ácidos nucleicos de los cromosomas se copia y se transmite a la descendencia. La mayor parte de esta información dirige la síntesis de proteínas enzimáticas, entre las cuales se encuentra un tipo especial (las polimerasas) que se necesitan para copiar los propios ácidos nucleicos.

Así pues, ¿qué fue primero, los ácidos nucleicos necesarios para sintetizar las polimerasas, o los enzimas necesarios para sintetizar los ácidos?

Durante muchos años, los intentos por resolver este problema, que recuerda al de la gallina y el huevo, se centraron en el ADN y el papel que desempeña en la fabricación de proteínas enzimáticas. Pero como el propio ADN es un producto de la evolución, una versión joven y más



avanzada de un ácido ribonucleico antecesor más primitivo, la atención pasó a centrarse sobre el ARN como almacén de información genética primigenio de la vida.

A principios de los años ochenta, este cambio de enfoque recibió su recompensa con el descubrimiento de los ribozimas, un tipo especial de ARN que no sólo alberga información, sino que además actúa como un sistema multienzimático. Aunque todos los ribozimas modernos son largos y complejos, las cortas partes que tienen propiedades enzimáticas son más sencillas y pudieran asemejarse a los ARNs de la vida primitiva.

Al igual que las proteínas enzimáticas, los ribozimas pueden dividir moléculas o unir las, y algunos pueden realizar ambas funciones.

Algunos son autodivisivos, capaces de seccionar una parte de la propia molécula y volver a unir los trozos resultantes.

Otros pueden cortar una parte de ellos mismos y moverla a otro lugar en la molécula.

Aun otros son capaces de ensamblar hebras de ARN.

Aunque no se ha encontrado ningún ribozima capaz de hacer una copia completa de sí mismo, el repetido cortar y pegar de que son capaces algunos demuestra una habilidad elemental para la autorreproducción. Algunos experimentos en los que se juntan en tubos de ensayo varias versiones de estos híbridos de gen y enzima muestran cómo habría podido iniciarse su evolución. Esta serie de descubrimientos recientes hace razonable la concepción de un mundo precelular en el cual genes desnudos primordiales de ARN se reprodujeran a sí mismos sin la ayuda de proteínas enzimáticas.

El objetivo último de crear vida en un tubo de ensayo, de fabricar a partir de cero «moléculas vivas» que se autoensamblen y se autorreproduzcan es cada vez menos un tema de ciencia-ficción. Las células son como burbujas de jabón.

Es obvio que los sistemas vivos necesitan células. Si los jugos de los organismos no estuvieran contenidos, se desparramarían, se mezclarían

con el medio y perderían el orden. Esta separación, que quizá no fuera necesaria para los genes desnudos primordiales, se hizo obligatoria a medida que la vida ganó en complejidad.

La clave para entender el origen de las células está en el adagio de los profesores de química: «lo semejante disuelve a lo semejante». El aguarrás y la pintura se mezclan fácilmente porque son químicamente semejantes. Pero el agua y el aceite no se mezclan porque su estructura química es muy diferente.

Las moléculas de agua ( $H_2O$ ) tienen forma de V con los dos átomos de hidrógeno en las puntas de la V y el átomo de oxígeno en la base. Gracias a esta disposición, las moléculas de agua funcionan como diminutos imanes: en un polo están los hidrógenos con carga positiva, y en el otro polo, el oxígeno, con carga negativa. Las moléculas de aceite, en cambio, no están cargadas, cual trocitos de plástico o de madera.

Así, las moléculas de aceite forman bolas en el agua porque tienen más afinidad entre ellas («lo semejante disuelve a lo semejante») que con el agua que las rodea.

Los jabones son compuestos especiales que construyen un puente entre el agua y el aceite. Los átomos cargados de uno de los extremos de una molécula de jabón el extremo hidrófilo (con afinidad por el agua) se disuelven en agua. El resto de la molécula es hidrófobo (con aversión al agua), una larga cadena de átomos de hidrógeno y carbono químicamente semejante al aceite y la grasa, en los que se disuelve fácilmente.

El jabón funciona porque mientras uno de los extremos se mezcla con el agua, el otro extremo disuelve la grasa.

Las células tuvieron su origen en procesos químicos parecidos. El caldo primordial era un ligero consomé en el cual los compuestos orgánicos hidrófobos se juntaban en grumos de forma natural según el parecido de su estructura química. Entre estos compuestos se contaban cadenas de hidrógeno y carbono, hidrocarburos como las colas de las moléculas de jabón. Algunas de estas moléculas tenían un extremo cargado eléctricamente y, cual jabones, tendían a agregarse formando pequeñas burbujas en las que los extremos cargados de las moléculas apuntaban

hacia el agua y las colas hidrófobas se congregaban en el interior, mezclándose con otros compuestos orgánicos hidrófobos.

Podemos vislumbrar el origen de las células por este proceso, aunque sólo vagamente. Aunque fina y frágil, la piel de las burbujas protegía los compuestos orgánicos concentrados en su interior, donde podían reaccionar y formar nuevas configuraciones. Con el tiempo, una segunda capa de moléculas semejantes al jabón se combinó espalda contra espalda con la primera para formar una película de dos capas, una estructura semejante a la de las membranas de las células actuales. La capa externa separa la célula del medio externo, y la capa cargada interna encierra una mezcla acuosa de compuestos orgánicos. Más tarde, esta doble capa flexible se robusteció con la adición de proteínas a la membrana. Estas ayudaban a mantener un intercambio controlado de nutrientes y desechos con el exterior. Todavía había de reforzarse con una robusta banda de carbohidratos y proteínas que la transformó en una resistente cápsula, como la que conforma las paredes celulares de las bacterias actuales. La estructura física, la configuración genética y los primeros mecanismos de producción de energía de las células evolucionaron al unísono desde el origen de la vida, y no uno tras el otro.

Pero una buena parte de la maquinaria metabólica no evolucionó hasta mucho más tarde, millones de años después de que aparecieran las primeras células.

## **Los fundamentos de la vida**

El metabolismo, el conjunto de procedimientos que permiten a las células fabricar y romper moléculas, es sorprendentemente simple. No se inventaron más que unas pocas vías, casi todas ellas versiones revisadas de vías más antiguas. El metabolismo se erigió como las murallas de una ciudad medieval, construidas en estadios sobre las piedras colocadas por generaciones anteriores.

La historia del metabolismo no es más que un ejemplo de cómo la evolución construye poco a poco sobre sistemas ya existentes.

Por qué opera la evolución de este modo es fácil de comprender. Las células son como relojes increíblemente intrincados, compuestos por un número enorme de partes que para funcionar dependen de otras por vías complejas. Las grandes modificaciones conducen al desastre. Pero se pueden hacer pequeños cambios, y un pequeño cambio tras otro acaban por dar lugar a una modificación notable.

Este principio de conservadurismo y economía, una importante lección sobre el proceso evolutivo, ayuda a resolver rompecabezas tan interesantes como por qué los humanos respiran oxígeno y por qué la vida se divide entre consumidores y consumidos.

Se conocen alrededor de dos millones de especies de organismos vivos (y quedan de tres a cinco veces más especies por conocer). Para mantenerse vivas, todas ellas requieren dos cosas esenciales: CHON y energía. La reproducción y la evolución van de la mano. Los organismos no pueden evolucionar sin reproducirse, pero para reproducirse requieren CHON, para formar la descendencia, y también energía.

Sólo se han inventado dos modos de satisfacer estas necesidades: autotrofia, la estrategia de las plantas; y heterotrofia, la estrategia de los animales.

Para satisfacer el requerimiento de CHON (moléculas de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno), los autótrofos (que se alimentan a sí mismos; del griego autos, uno mismo, y trophos, alimentar) absorben nutrientes simples (generalmente dióxido de carbono, agua, nitrato y fosfato) y construyen con ellos las moléculas orgánicas que los han de sustentar.

Algunos autótrofos (los llamados quimioautótrofos) obtienen la energía para la síntesis de moléculas orgánicas de reacciones químicas no alimentadas por la luz, pero la mayoría son fotosintetizadores (o sea, fotoautótrofos), plantas o microorganismos semejantes que obtienen la energía de la luz del sol para fabricar compuestos orgánicos simples como la glucosa.

En ambos tipos de autótrofos, parte de la energía absorbida se almacena en los enlaces químicos que unen C, H, O y N, y puede liberarse más tarde cuando el organismo la necesite.

Los autótrofos se construyen a sí mismos y se alimentan a sí mismos: toman CHON del medio para fabricar compuestos orgánicos que pueden luego romper para utilizar la energía que almacenan.

Los animales y organismos semejantes (protozoos, hongos y la mayoría de los microbios no fotosintetizadores) siguen una estrategia diferente, la heterotrofia (que se alimentan de otros; del griego heteros, otro, y trophos, alimentar).

Los heterótrofos obtienen CHON de la comida y la energía de los enlaces que unen los átomos en las moléculas orgánicas de la comida. Tal como Oparin intuyó hace décadas, los animales son metabólicamente más sencillos que las plantas.

Los heterótrofos usan alimentos preparados: sólo necesitan romperlos. En cambio, las plantas y otros autótrofos tienen que hacer su propia comida para luego romperla.

La estructura del mundo vivo actual no es compleja. Sólo existen dos requerimientos, CHON y energía, y sólo dos estrategias principales para satisfacerlos, la autotrofia y la heterotrofia.

El mundo vivo siempre ha tenido aproximadamente esta misma estructura, pero ésta, igual que la propia vida, ha evolucionado desde unas raíces más simples. Cada una de las dos estrategias se da en dos os grupos de eubacterias: las cianobacterias y las bacterias purpúreas.

La forma avanzada de la fotoautotrofia, la fotosíntesis oxigénica (que produce oxígeno), fue inventada por las cianobacterias hace unos 3.500 millones de años cuando la Tierra se encontraba en su infancia.

Mucho más tarde, hace quizá tan sólo 2.000 millones de años, uno de sus descendientes fue tragado por un organismo unicelular eucariota. Como la cianobacteria capturada (pero no digerida) llevaba consigo la maquinaria metabólica para la fotosíntesis, se estableció entre ambos organismos una relación simbiótica (yo por ti, tú por mí). La cia-

nobacteria funcionaba como una práctica factoría interna de comida, mientras que el huésped eucariota proporcionaba refugio (este tipo de relación recibe el nombre de «endosimbiosis»)

Con el tiempo, la alianza se hizo más fuerte, la mayoría de los genes de la cianobacteria se transfirieron al huésped y los endosimbiontes evolucionaron hasta convertirse en las estructuras que hoy conocemos como cloroplastos, unos cuerpos celulares protegidos por una membrana (orgánulos) que albergan el aparato fotosintetizador en los fotoautótrofos eucariotas como las plantas.

Una secuencia de eventos similar condujo a la formación de la célula eucariota, que respira oxígeno: bacterias purpúreas endosimbiontes evolucionaron hasta convertirse en las factorías de energía aeróbicas de las células eucariotas, los orgánulos cilíndricos conocidos como mitocondrias.

La evolución de la endosimbiosis proporcionó a los eucariotas la maquinaria metabólica para la fotosíntesis y la respiración ya preempaquetada y lista para usar en unos sistemas ya probados y perfeccionados.

La validez de la lección persiste: ¡la evolución es realmente conservadora y económica!

La evolución preempaquetada explica por qué se encuentra el mismo tipo de fotosíntesis en las plantas y en las cianobacterias, pero no explica sus inicios.

¿Es una versión refundida de una invención más temprana o se inventó desde cero en las cianobacterias hace miles de millones de años?

¿Y qué origen tuvo la respiración aeróbica?

La respiración requiere oxígeno; entonces, ¿cómo pudo establecerse si no había oxígeno en la atmósfera primitiva?

En pocas palabras, si la evolución sólo construye sobre algo que ya existe, ¿cómo se producen las invenciones? La forma de vida más primitiva extrae Energía de la fermentación del azúcar.

## **Empecemos por el principio.**

Entre las formas de vida más primitivas existían algunas que realizaban la glucólisis, una forma de fermentación (metabolismo anaerobio) basada en escindir una molécula de seis carbonos de glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) en dos moléculas de tres átomos de carbono de piruvato.

La reacción produce energía, que se libera al romperse los enlaces químicos de la glucosa, y parte de esta energía se almacena para su uso futuro en un compuesto denominado ATP (trifosfato de adenosina, en sus siglas inglesas).

Cada vez que se escinde una molécula de glucosa se forman dos unidades de energía (dos moléculas ricas en energía de ATP). La glucólisis es casi tan antigua como la vida misma. Es fundamental para la vida y se da en todos los organismos. Un «paquete» de diez reacciones aceleradas por sendos enzimas es demasiado grande para haberse originado más de una vez.

Además se trata del mecanismo biológico de producción de energía químicamente más sencillo, se produce en el citosol acuoso de las células (en lugar de precisar un orgánulo o membranas como en los sistemas más avanzados), libera mucha menos energía que los mecanismos más avanzados y es anaerobio como corresponde al ambiente primitivo. La glucólisis requiere glucosa.

Pero los experimentos sobre la Tierra primitiva del tipo del de Miller demuestran que en el caldo primordial se encontraban muchos otros azúcares. Así pues, ¿por qué se convirtió la glucosa en el combustible universal de la vida? Probablemente porque es particularmente resistente, siendo el azúcar de seis carbonos menos sensible a cambios de temperatura, acidez y otros. En un ambiente severo, la glucosa era el azúcar más fácil de obtener.

De acuerdo con esta concepción (de Oparin-Miller), la Tierra primitiva estaba poblada por microorganismos heterótrofos anaerobios que se alimentaban de glucosa en el caldo primordial. Pero al multiplicarse, estas células simples habían de acabar por agotar el suministro de glucosa. Si no hubiera aparecido una nueva fuente de glucosa, habrían

acabado al borde de la extinción y la glucólisis se habría perdido para siempre.

## **Una nueva fuente de combustible**

El problema era la escasez de glucosa. Para mantenerse, la vida necesitaba encontrar una fuente de glucosa más abundante. Se halló una solución inicial en la evolución de unos microbios capaces de fabricar glucosa por sí mismos mediante una suerte de glucólisis al revés.

La fabricación de glucosa (técnicamente, «biosíntesis de glucosa») comporta once pasos enzimáticos. Siete de éstos utilizan los mismos enzimas que la glucólisis, pero operan en sentido inverso.

Para construir un sistema de fabricación de glucosa no se tuvo que cambiar la glucólisis para nada, se duplicaron los genes de siete de los enzimas y sólo hubo que añadir cuatro enzimas adicionales.

En lugar de inventar un nuevo juego de genes y enzimas, la evolución fue conservadora y económica.

¿Cómo puede el mismo juego de enzimas catalizar una secuencia de reacciones químicas hacia delante y hacia atrás?, y ¿por qué sólo se transfirieron a la nueva vía siete de los enzimas de la glucólisis, y no los diez'?

Imaginemos un tren de juguete que se mueve sobre una vía. Si la vía se extiende sobre un plano, se necesita la misma fuerza para moverlo en un sentido que para moverlo en el opuesto. Así ocurre con la mayoría de las reacciones catalizadas por enzimas: con la misma facilidad que el enzima acelera la reacción en un sentido, la acelera en el sentido opuesto. Se trata de reacciones reversibles.

Pero el caso es diferente si la vía discurre por una colina. Para que el tren suba la cuesta se necesita energía adicional, mientras que cuando el tren baja por la cuesta se libera energía (debido a la gravedad).

De igual modo, las reacciones enzimáticas que o bien consumen energía o bien la liberan (liberada o absorbida por moléculas de ATP) sólo ocurren fácilmente en un solo sentido. En esencia, son irreversibles.



Durante la glucólisis, dos de las reacciones requieren energía mientras que una tercera la libera. Estos son los tres pasos irreversibles que catalizan los cuatro nuevos enzimas inventados para la biosíntesis de glucosa.

No obstante, esta solución a la escasez de combustible habría sido, a lo sumo, una solución temporal, un parche. Las células que fabrican glucosa de este modo usan tres veces más energía de la que obtienen durante la fermentación de la glucosa.

Ningún organismo puede sobrevivir durante mucho tiempo consumiendo más energía de la que produce. Al igual que cargar gastos a una tarjeta de crédito, esta solución, válida a corto plazo, a largo plazo sólo puede traer problemas.

Pero la biosíntesis de glucosa fue un punto de partida que pronto dio pie a la solución definitiva al problema energético de la vida: la evolución de una nueva vía de síntesis de glucosa que usaba la energía de la luz.

Pero antes era necesario solucionar otro problema.

El nitrógeno plantea un problema: Aunque la glucosa es una fuente práctica de carbono, hidrógeno y oxígeno, la vida también necesita nitrógeno para las proteínas: los ácidos nucleicos y el ATP. ¿Cuál es la fuente de nitrógeno?

Para que los microbios heterótrofos anaerobios prosperen basta con proporcionarles glucosa (fuente de CHO y energía) y amoníaco (fuente de N).

Ambos debían ser abundantes cuando se originó la vida, pero el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) pronto se hizo escaso. La luz UV rompe fácilmente los enlaces químicos que unen el nitrógeno al hidrógeno en el amoníaco.

Como prácticamente no había oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) en la atmósfera primitiva, la capa de ozono ( $\text{O}_3$ ) estratosférico que hoy forma un escudo contra la radiación UV no existía y el amoníaco se destruía con rapidez.

El nitrato ( $\text{NO}_3$ ), la otra fuente de nitrógeno utilizada por muchos otros microorganismos, era también escaso. En la actualidad se forman grandes cantidades de nitrato cuando el nitrógeno y el oxígeno se combinan durante las tormentas eléctricas, pero esto no podía ocurrir en la atmósfera primitiva porque no contenía oxígeno.

Debido a la necesidad de obtener nitrógeno, la escasez de amoníaco y de nitrato planteaba un serio problema para la vida. Sólo quedaba otra fuente por explotar: el abundante gas nitrógeno de la atmósfera.

Pero los átomos de nitrógeno de  $\text{N}_2$  están unidos fuertemente mediante tres enlaces. Para romperlos era necesario inventar un nuevo sistema enzimático. El agente responsable de combinar el nitrógeno atmosférico con el hidrógeno y «fijarlo» en forma de amoníaco se denomina nitrogenasa o complejo Nif, y la pieza clave del complejo es una proteína, la ferredoxina. Como la fijación de nitrógeno es una reacción energéticamente muy costosa, el complejo Nif sólo entra en acción como último recurso cuando ya se ha agotado el suministro de amoníaco y nitrato. Un sistema tan costoso no hubiera evolucionado de no haber sido esencial para la vida.

El complejo Nif movido por la ferredoxina, data de los primeros estadios del origen de la vida, cuando no había oxígeno en la atmósfera. La mayoría de las eubacterias primitivas y de las arqueobacterias pueden fijar el nitrógeno atmosférico; en cambio, los eucariotas, que evolucionaron mucho más tarde, no pueden.

Al igual que otros sistemas enzimáticos antiguos, la fijación de nitrógeno se frena en presencia de trazas de oxígeno molecular. La fijación de nitrógeno tiene lugar sólo si el sistema enzimático está aislado del  $\text{O}_2$ .

Incluso en cianobacterias productoras de oxígeno, que han desarrollado células y mecanismos químicos especiales para proteger el sistema de fijación de nitrógeno.

## ¿Cómo se originó la ferredoxina?

Los cincuenta y cinco aminoácidos que forman la ferredoxina de una bacteria típica (*Clostridium*) están ordenados de una manera que desvela la historia de la molécula. La proteína comenzó con sólo cuatro aminoácidos. El gen de este cuarteto se multiplicó repetidas veces para formar un gen mayor de una protoferredoxina compuesta por veintiocho aminoácidos, es decir, siete cuartetos unidos en una cadena.

Mutaciones posteriores añadieron otro aminoácido y cambiaron otros de lugar, y luego el gen de esta proteína de veintinueve aminoácidos se duplicó para dar lugar a una ferredoxina primitiva de cincuenta y ocho aminoácidos de longitud.

Tras varias mutaciones, se eliminaron tres aminoácidos de uno de los extremos de la molécula para formarse finalmente la ferredoxina del *Clostridium* actual.

Utilizando como pieza de construcción el cuarteto inicial, la ferredoxina evolucionó simplemente por copia y reestructuración de un sistema que ya funcionaba. Nuevamente, la evolución fue conservadora y económica.

La copia de genes debió de ser especialmente frecuente durante el desarrollo inicial de la vida, cuando el CHON y la energía eran escasos. En experimentos de laboratorio con bacterias cultivadas en medios pobres se ha visto que las que sobreviven son casi invariablemente mutantes que poseen varias copias extra de enzimas metabólicas. Aun en un medio normal, se encuentran genes duplicados en aproximadamente una de cada mil bacterias, de modo que en mil millones de bacterias (un tamaño normal para una colonia de organismos tan pequeños) hay más o menos un millón con copias extra.

Mientras haya al menos una copia que funcione, las otras pueden mutar sin causar problemas y así se producen a veces genes que codifican enzimas más rápidos que los originales.

Una vez iniciado el desarrollo de la vida, la copia de genes le dio abundante grano al molino evolutivo. Según el esquema bosquejado hasta el momento, la estrategia primera de la vida fue la heterotrofia anaerobia,

para la cual se obtenía CHO del consomé primordial, N del nitrógeno atmosférico (y de amoníaco y nitrato, si había) y energía de la fermentación.

Pero la glucosa era un combustible escaso incluso después de que algunas células encontraran una manera de producirlo. Este problema se solucionó con la aparición de los autótrofos capaces de hacer la fotosíntesis, un proceso que produce grandes cantidades de glucosa (a diferencia de los mecanismos no biológicos) de un modo energéticamente rentable (a diferencia de la biosíntesis de glucosa).

La fotosíntesis se puede hacer de dos maneras, una primitiva y otra avanzada, que tienen mucho en común.

Utilizan pigmentos parecidos y procedimientos químicos semejantes para fabricar el mismo producto (glucosa) a partir de la misma materia prima (dióxido de carbono) mediante una vía metabólica prácticamente idéntica (la biosíntesis de glucosa usando energía de la luz) y ambas se encuentran en miembros del dominio de las eubacterias.

Los fotosintetizadores primitivos, que eran variedades de bacterias fotosintéticas, utilizan bacterioclorofila para captar la luz y no producen oxígeno como producto derivado (es decir, es un proceso anoxigénico).

Los fotosintetizadores avanzados, las cianobacterias, utilizan clorofila (del mismo tipo que se encuentra en las plantas) para captar la energía de la luz y su fotosíntesis es oxigénica, es decir, libera oxígeno.

Ambos tipos de fotosintetizadores pueden usar asimismo la energía de la luz para auxiliar la absorción de materia orgánica del medio, un modo de vida (fotoheterotrofia) que es aún más primitivo que la fotosíntesis. A lo que parece, la energía de la luz se utilizaba primero para coadyuvar a la heterotrofia y sólo más tarde para la biosíntesis de glucosa en los fotosintetizadores autótrofos: otro ejemplo del conservadurismo y la economía de la evolución.

Aunque estrechamente relacionadas, las dos formas de fotosíntesis difieren en varios aspectos.

Las dos combinan hidrógeno y dióxido de carbono para fabricar glucosa, pero el hidrógeno tiene distinta procedencia.

En el proceso primitivo, el hidrógeno proviene del gas hidrógeno ( $H_2$ ), de pequeños compuestos orgánicos o de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ).

En la fotosíntesis avanzada, el hidrógeno siempre procede del agua, y esta es la razón por la cual se libera oxígeno, que queda libre cuando la molécula de  $H_2O$  se escinde para utilizar el hidrógeno. Para usar el hidrógeno del gas o de compuestos orgánicos no hace falta mucha energía, y para usar el hidrógeno del  $H_2S$  apenas algo más (78 kilocalorías).

Pero el hidrógeno y el oxígeno están fuertemente unidos en las moléculas de agua y para separarlos hace falta invertir mucha más energía (118 kilocalorías).

La fotosíntesis primitiva, la anoxigénica, requiere menos energía que la avanzada. Por ello, la primitiva es más sencilla. Utiliza un solo fotosistema sensible a la luz para captar la energía de la radiación solar, mientras que la fotosíntesis avanzada utiliza dos fotosistemas, vinculados por una cadena de enzimas que transfieren energía del uno al otro.

La evolución es casi siempre conservadora y económica. Sin embargo, la fotosíntesis avanzada requiere más energía y es más compleja que la primitiva.

¿Qué compensa estos inconvenientes?

La guerra de gases microbiana

Parte de la respuesta radica en la disponibilidad de hidrógeno. En las formas que los fotosintetizadores primitivos podían usar, el hidrógeno era localmente abundante (en fuentes termales y fumarolas, por ejemplo, donde burbujea el  $H_2S$  hasta la superficie), pero debía de ser escaso en otros lugares. El agua, en cambio, existía en casi todos los ambientes. Al poder usarla, los fotosintetizadores avanzados disponían de nuevos ambientes que colonizar.

Las interacciones con el oxígeno molecular eran si cabe más importantes. Mientras que bastan trazas de oxígeno libre para inactivar los en-

zimas que usan las bacterias fotosintéticas primitivas para fijar nitrógeno o fabricar bacterioclorofila, las cianobacterias, que realizan la fotosíntesis oxigénica, crecen sin problema en presencia de oxígeno.

Esta diferencia tuvo un enorme impacto sobre la historia de la vida. Imaginemos lo que ocurrió cuando el primer productor de oxígeno apareció en escena.

Los microbios de esta nueva cepa mutante, las primeras cianobacterias, compartían un ambiente de aguas someras con su ascendencia genética, las bacterias fotosintéticas anaerobias, donde los dos grupos competían por la luz.

Pero los recién llegados traían consigo una ventaja contundente en la lucha darwiniana. Su nuevo tipo de fotosíntesis producía oxígeno molecular, un gas tóxico para sus vecinos anaerobios.

Había estallado una guerra de gases entre los microorganismos!

Los ascendentes bacterianos se encontraban en una situación desesperada, incapacitados para fijar gas nitrógeno o fabricar bacterioclorofila. Su supervivencia estaba en entredicho: sólo podían retirarse o morir. Gracias a unos cuantos trucos aprendidos tempranamente en su historia, las bacterias primitivas se retiraron y sobrevivieron.

Cuando estos fotosintetizadores primitivos se originaron y empezaron a evolucionar, el mundo estaba prácticamente desprovisto de oxígeno libre y bañado en la letal radiación UV. Para fotosintetizar tenían que estar expuestos a la luz del sol, pero si intentaban crecer en donde hubiera demasiada luz, no lo contaban. Para solucionar este problema, vivían en los fondos lodosos de los mares someros, protegidos de la radiación UV por una capa de agua, y además muchos desarrollaron la capacidad de deslizarse para así poder escapar de ambientes demasiado expuestos.

Cuando las cianobacterias productoras de oxígeno invadieron la escena, los anaerobios incapaces de moverse seguramente murieron a montones, pero las bacterias fotosintéticas capearon el temporal retirándose a un ambiente libre de oxígeno dentro de los lodos del fondo.

Los fotosintetizadores primitivos, primitivos pero listos, sobrevivieron huyendo de la zona de guerra.

En la actualidad, las cianobacterias y las bacterias fotosintéticas viven armoniosamente en comunidades laminares de estromatolitos, donde coexisten porque disponen de pigmentos distintos para captar la luz. Los productores de oxígeno pueblan la capa más superior y los fotosintetizadores anoxigénicos las capas inferiores (y aun las bacterias anaerobias que no necesitan luz pueden habitar en capas inferiores).

Aunque la clorofila de las cianobacterias absorbe la mayor parte de la luz, esto no acaba con las bacterias fotosintéticas subyacentes porque su bacterioclorofila es sensible a la luz de una longitud de onda tal que se filtra hasta donde habitan.

### **¿Por qué respiramos oxígeno?**

Según el dicho, «la basura de uno es el tesoro de otro». Para los anaerobios, el oxígeno no sólo es el desecho de otros organismos; es un veneno mortal. Pero para los aerobios ocurre todo lo contrario: el oxígeno es un elixir; la esencia que propulsa el proceso sobre el que depende su propia vida, la respiración aerobia. ¿Cómo funciona y cómo se formó?

La respiración aerobia tiene tres partes.

En primer lugar, la glucólisis rompe la glucosa, produciendo piruvato y dos moléculas de ATP (más agua) por cada molécula de glucosa.

En segundo lugar, se escinde el piruvato en un sistema cíclico (el ciclo del ácido cítrico), en el que se forman dos nuevos ATPs, electrones y dióxido de carbono.

En tercer lugar, el oxígeno interviene en un proceso por el cual los electrones provenientes del ciclo del ácido cítrico se conducen por una cadena de transportadores de electrones impulsados por enzimas.

En este proceso se producen treinta y dos ATPs más. En total, treinta y seis moléculas de ATP por cada molécula de glucosa.

Respirar oxígeno por esta vía aerobia representa un enorme avance con respecto a la vía más primitiva de fermentación de la glucosa (que consiste sólo en la glucólisis).

Por el proceso primitivo se obtienen tan sólo dos moléculas de ATP por cada molécula de glucosa metabolizada, lo que equivale a un magro 2 por 100 de la energía almacenada en una molécula de glucosa. Mediante el proceso aerobio se obtienen treinta y seis, un descomunal 38 por 100 de la energía disponible (y una eficiencia superior a la de la mayoría de motores de automóviles, que es del 25 por 100).

¿Cuáles son las raíces evolutivas de este proceso vital y tan notablemente rentable?

El origen de la primera parte, la glucólisis, ya se ha explicado. Heredada de heterótrofos anaerobios primitivos, precede en mucho a la aparición de formas de vida que respiran oxígeno.

La segunda parte, el ciclo del ácido cítrico, también proviene de otras manos, una versión invertida del ciclo de «reacciones oscuras» de la fotosíntesis bacteriana.

Y la tercera, la parte que consume oxígeno, es una versión renovada de los mecanismos químicos que enlazan los dos fotosistemas sensibles a la luz de los fotosintetizadores oxigénicos.

Con la renovación y reutilización de procesos inventados con anterioridad, la evolución nuevamente se muestra conservadora y económica. Las raíces evolutivas de la respiración aerobia pueden verse en los niños cuando juegan. Cuando corren rápido y con es-fuerzo, a veces les dan agujetas y tienen que descansar un momento para recuperar el aliento. ¿Por qué se alivia entonces el dolor?

Las agujetas se producen cuando los músculos utilizan el oxígeno tan rápido que no queda suficiente para realizar la respiración aerobia. A medida que la deficiencia de oxígeno aumenta, la glucólisis produce más piruvato del que puede metabolizarse y el exceso se convierte en el ácido láctico causante de las agujetas. Al recuperar el aliento, se restablece el equilibrio entre el suministro de oxígeno y la producción de piruvato.



Con tiempo suficiente, el ácido láctico acumulado se convierte en glucosa (por la vía de la biosíntesis de glucosa), que vuelve a entrar en el ciclo de la respiración.

El ejercicio vigoroso obliga a los humanos y al resto de los animales a volver a sus orígenes metabólicos primitivos, la glucólisis y la biosíntesis de glucosa, dos procesos inventados por microbios anaerobios en un pasado geológico distante

### **Los cuatro estadios del desarrollo del metabolismo moderno**

El metabolismo que impulsa los ecosistemas actuales evolucionó en cuatro estadios, todos ellos, salvo el primero, versiones refundidas de los que habían existido anteriormente:

1. Heterotrofia anaerobia (fermentación) Entre las vías metabólicas más tempranas se cuenta la glucólisis, una vía química sencilla usada por los heterótrofos anaerobios para generar energía al romper la glucosa que obtenían del medio. A medida que se agotaba el suministro de glucosa, las células inventaron una versión inversa de la glucólisis, la vía de biosíntesis de glucosa. Esta vía permitía fabricar más glucosa, pero sólo servía de medida provisional, puesto que requería más energía de la que producía. El suministro de glucosa seguía siendo bajo. Y el nitrógeno, en formas que los organismos primitivos pudieran utilizar, también era escaso, un problema que sólo se solucionó con la invención de la fijación de N<sub>2</sub> mediante un complejo enzimático con ferredoxina. Sin embargo, el coste energético seguía siendo alto.

2. Fotoautotrofia anaerobia (fotosíntesis anoxigénica) La capacidad de captar la energía de la luz mediante pigmentos, resultado de la evolución en los heterótrofos anaerobios, mejoró los medios de absorción de compuestos orgánicos del medio.

La modificación de esta maquinaria, basada en la bacterioclorofila, permitió asimismo usar CO<sub>2</sub> en lugar de compuestos orgánicos como fuente de carbono celular. Al vincularse este mecanismo con la vía de la biosíntesis de glucosa, desarrollada más tempranamente, nació la fotoautotrofia anoxigénica, una forma primitiva de fotosíntesis por la

cual la energía de la luz captada por un solo fotosistema se utiliza en la síntesis de glucosa, el combustible celular universal. Este mecanismo era rentable y proporcionaba abundante glucosa.

Así la vida rompía al fin su dependencia de compuestos orgánicos de origen no biológico. Sin embargo, pasaba a depender de un suministro de hidrógeno que sólo era abundante localmente.

3. Fotoautotrofia aerobia (fotosíntesis oxigénica) La evolución produjo a continuación una forma de fotoautotrofia más compleja que se basaba en dos fotosistemas de clorofila sensibles a la luz que estaban vinculados y usaban una fuente particularmente abundante de hidrógeno: agua (H<sub>2</sub>O). Esta nueva forma cianobacteriana de fotosíntesis basada en la escisión del agua liberaba oxígeno, un gas tóxico para los anaerobios competidores. Incapaces de sobrevivir en este ambiente, algunos anaerobios se extinguieron mientras que otros se retiraron a un ambiente más tolerante. Las cianobacterias quedaban libres para colonizar vastos espacios en toda la superficie de la Tierra, soberanos indiscutibles de un nuevo reino.

4. Heterotrofia aerobia (respiración aerobia) La creciente abundancia de oxígeno molecular que la fotosíntesis cianobacteriana bombeaba al medio ofrecía una oportunidad de oro a la vida. Cuando se combina oxígeno con sustancias orgánicas se libera energía rápidamente (como ocurre en los incendios, por ejemplo).

Este es el eficiente mecanismo de obtención de energía que explota la última invención metabólica, la respiración aerobia. Este proceso se realiza en tres pasos.

El primer paso, la glucólisis, se tomó prestado y sin modificar del proceso de fermentación de las bacterias anaerobias.

El segundo paso, el ciclo del ácido cítrico para la generación de electrones, es una versión refundida de un proceso químico inventado por las bacterias fotosintéticas.

El tercer paso, una vía metabólica que consume oxígeno, es una versión modificada del sistema de transporte de electrones de la fotosíntesis oxigénica.

Al vincular estos tres procesos, la vida consiguió una nueva y potente herramienta para la obtención de energía.

Los procesos metabólicos clave de la vida actual (la heterotrofia y la fotoautotrofia, anaerobias y aerobias) evolucionaron en microorganismos hace miles de millones de años. Tanto si energía y CHON circulan entre plantas y animales, como ocurre hoy, o tan sólo entre microorganismos, como ocurría en el pasado distante, se utilizan los mismos sistemas y se aplican las mismas reglas.

Los ecosistemas actuales no son, en este sentido, nada modernos. Son sólo versiones a gran escala de aquel primer ecosistema que se estableció entre microorganismos primitivos. ■