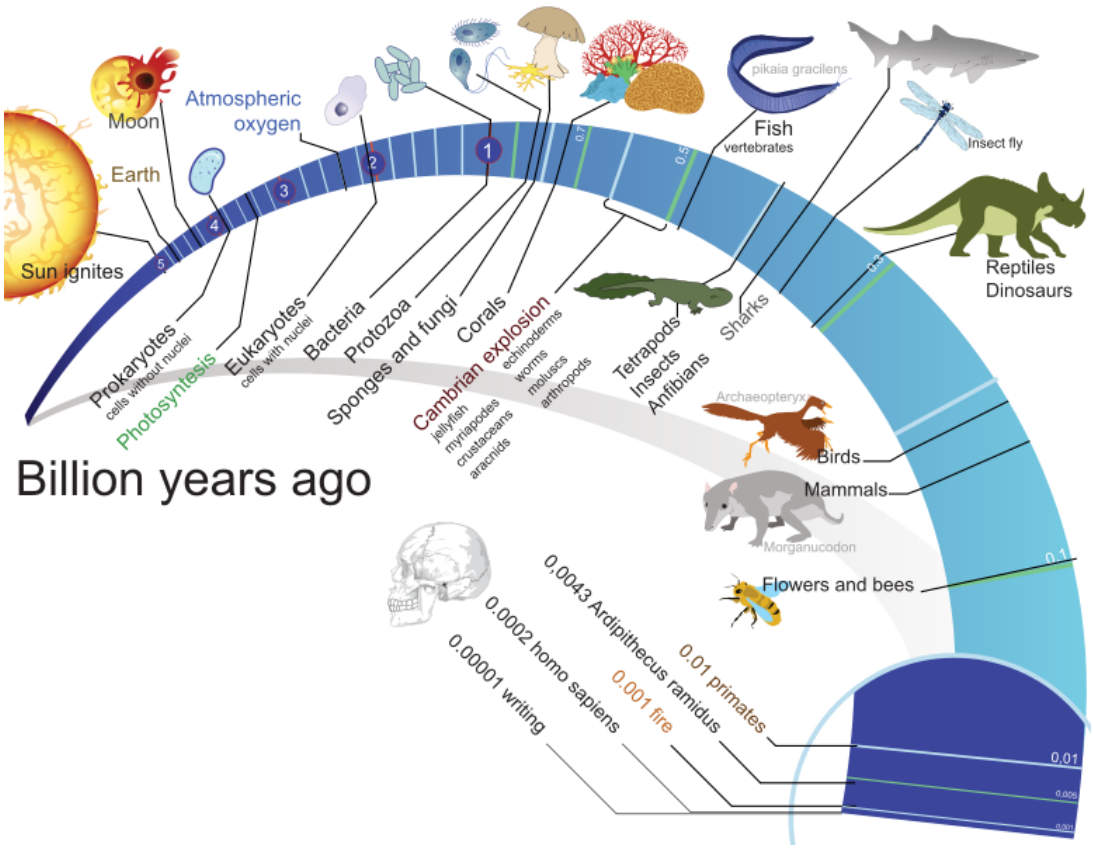
La biografía de la Vida

Una maravillosa aventura

Volumen I



Jaime Reguart Pelegrí

La biografía de la Vida
Una maravillosa aventura

Volumen I

Diciembre 2015

Revisión junio 2025

A partir de la serie "*La Biografía de la Vida*" editada en el blog El Cedazo.

(http://eltamiz.com/elcedazo/series/la-biografia-de-la-vida/)

Imagen de portada extraída de Wikimedia.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Timeline_evolution_of_life.svg?uselang=es

Licencia CC BY-NC-ND 2.5 ES

El único coste será el exclusivo de edición. El autor.

ÍNDICE

Volumen I

Prólogo 9

01. Hadeico 13
02. Algunas generalidades 33
03. La química se apunta a lo bio 50
04. Se inicia la complejidad 62
05. La casa natal de la Vida 77
06. Entramos en el eón Arcaico 95
07. Rudimentos de gestión energética 108
08. El metabolismo constructor 119
09. La vida en el Arcaico 131
10. Abrimos las puertas del Proterozoico 148
11. Aparecen las células eucariotas 160
12. La reproducción sexuada 179
13. La genética 190
14. La reproducción 215
15. La multicelularidad puerta de la complejidad 222
16. El árbol filogenético del Precámbrico 237
17. Fin del Proterozoico. Paréntesis filogenético 253
18. La biota del Cámbrico 261
19. Los filos del Cámbrico 276
20. La evolución por selección natural 296
21. La posibilidad real del cambio 312
22. Diferenciación celular y morfogénesis 320
23. El caso de la célula que se diferenció por "altruismo" 342
24. Dos nuevas habilidades: bilateralidad y segmentación 349
25. Evolución de la notocorda y del sistema nervioso 361
26. Evolución de herramientas de sostén y alimentación 370
27. Evolución del ojo 382

28. El Ordovícico 391
29. El Silúrico 407
30. El Devónico: desarrollo de las plantas 424
31. El Devónico: la edad de los peces 437
32. El Devónico: los tetrápodos conquistan la tierra 449

Volumen II

33. Los misterios de las cuatro extremidades 9
34. Entramos en el Carbonífero 26
35. El Carbonífero nos incita a hablar de insectos 40
36. Anfibios y reptiles del Carbonífero 51
37. El Pérmico: fin del Paleozoico 65
38. La gran extinción del Pérmico-Triásico 80
39. Periodo Triásico 90
40. Parque Jurásico 118
41. Grandes dinosaurios 138
42. De los dinosaurios voladores a las aves 154
43. El Cretácico y sus plantas 168
44. La biota animal en el Cretácico 186
45. Los mamíferos del Cretácico 205
46. La crisis del Cretácico/Terciario 216
47. Comienza el Terciario 233
48. El Paleoceno 250
49. El Eoceno 268
50. Oligoceno y Mioceno 283
51. Los últimos 5 millones de años 299
52. Iniciación a los más próximos homínidos 311
53. Desde el primer hominino hasta el nuevo Homo 320
54. Los Homo 333
55. El corazón de la evolución humana 348
56. La aventura viajera del Homo 363
57. Reflexiones 376
58. Buscando vida desesperadamente 385
59. Extremófilos 396

60. ¿Tenemos vecinos? 406
61. ¿Hay vida aún más lejos? 419
62. Últimas palabras 434

ANEXO 1: Somera cronología de la Vida y la evolución 438

ANEXO 2: Bibliografía y fuentes de información 442

La biografía de la Vida: Una maravillosa aventura

"*Toda descripción, por objetiva e ingenua que parezca, constituye interpretación personal, punto de vista propio del autor. Sabido es que el hombre mezcla a toda su personalidad y, cuando cree fotografiar el mundo exterior, a menudo se contempla y se retrata a sí mismo*" (**Santiago Ramón y Cajal**).

No soy un geólogo, ni un químico, ni tampoco físico ni biólogo: mi formación es de ingenierillo generalista. Con unas inquietudes que me han llevado a investigar por mi cuenta y riesgo en determinados temas. Uno de ellos responde a la pregunta de *¿la vida biológica es un acto de fe? ¿O es algo tan natural como la lluvia?*

Con esta mochila inicié más o menos en 2010 la senda que me llevó a husmear todo lo que me resultó interesante sobre el origen de la Vida. Muchos libros, muchos artículos, mucha página web. Sin más criterio que el que deducía al ir abriendo páginas que a su vez me llevaban al conocimiento de nuevos horizontes para explorar. Mi cabeza de jubilado -retirado, por si a alguién le gusta más esta palabra- me exigía tomar notas para no olvidar. Mi mente cuadriculada (me gustaría decir en su lugar "científica") me llevó a enhebrar todas mis chuletas, encajarlas y darles una coherencia. A la vez me divertía, y mucho, el trabajo manual de edición y de ilustración.

El resultado ha sido un voluminoso y enciclopédico (para mí) tratado sobre lo que se teoriza hoy en día acerca de la Vida ¿A que suena sublime?
Pero, ¡ah! Todo tiene su "ah", y en este caso estoy seguro de que ya lo habréis pensado: y este pardillo indocumentado… ¿a dónde va?
Pues bien, yo también me dije lo mismo: ¿cómo sé que lo que he recopilado, ordenado, escrito y dibujado está bien? ¿Cómo sé que está lo esencial y no falta algún aspecto crítico? ¿Habré metido la

pata gloriosamente? Recordad que soy un ingeniero y que, cuando empecé mi labor, del tema que me traía no sabía nada y que tenía, por tanto, la credibilidad que se merece un neófito. Es decir, poca.

Mi osadía me animó, con toda seguridad irresponsablemente, a poner en común mis escritos, aportándolos a la plaza pública del blog El Cedazo. Pero con un propósito bien claro: Qué los que supieran del tema me lo criticaran y así poder mejorar el conocimiento y estar seguro de que lo ya aprendido por mí estaba en el conjunto de las verdades. Un poco alambicado, pero en el fondo buscaba el que los lectores me ayudaran a corregir mi escrito. Desde El Cedazo hice mi propuesta pública: *"... que me acompañéis en mi aventura de bucear por los mares y ríos de la Vida. El objetivo es pasarlo bien y aumentar nuestra personal sabiduría. No seáis crueles conmigo, ni siquiera muy exigentes: me pongo bajo la tutela y amparo de nuestro padre fundador, Pedro* -Gómez-Esteban, alma del blog El Tamiz-*, que bien dijo un día, "antes sencillos que incomprensibles" ... o algo así"*.

El resultado, más que satisfactorio desde mi perspectiva personal, fueron dos años y medio de labor e intercambio de opiniones, tras los que surgió el texto que ahora propongo.

Y dicho lo dicho, paso a comentar el programa del mismo.

En este libro voy a hablar de todo lo que pasó entre la acreción del disco de nuestro sistema solar hasta la época del *Homo sapiens*, de todo lo que sucedió en este intervalo y tuvo algo que ver con la aparición de organismos complejos. Con una apostilla final intentando argumentar como va a seguir el guión de la Vida.

Hablaré del escenario, cómo se creo, cómo evolucionó, cómo condicionó el entorno que dio a luz a la Vida terrestre y su evolución. Geología, climatología, física, química y biología. De vez en cuando alguna digresión teórica elemental, que me pareció oportuna para aclarar y hacer más colorido el relato. Voy a

agruparlo, lo mejor que pueda y me salga, según el transcurrir cronológico de las edades geológicas.

Por delante nos queda:

- la gran formación del escenario, la Tierra;
- la primera química biológica;
- el primer actor celular;
- como se espabiló para buscar alimento y energía;
- ¡y se hizo el oxígeno!;
- los encuentros y desencuentros hasta la célula con núcleo;
- el último empujón antes de la gran representación: la pluricelularidad;
- el baile de los continentes preparando el escenario;
- la explosión de la variedad de hace 540 millones de años;
- el camino de la complejidad corporal que llevó a las nuevas y definitivas formas;
- la triple conquista de la tierra por las criaturas marinas;
- el camino evolutivo de los grandes seres;
- aparece el hombre racional y ético como un hecho natural;
- ¿hay o habrá vida además de la nuestra?

Un último y muy importante aviso por si no quedó claro: repito, soy un poseedor de mucha información y no soy experto en nada. Un amante del tema que ha jugado a periodista o notario del mismo. Este texto, aunque cerrado como archivo digital o formato en papel, sigue abierto: cualquier comentario que se os ocurra será más útil para mí, o para la curiosa comunidad lectora interesada por los caminos de la Vida, que para el que lo genere. Así que bienvenidos sean. Desde aquí y ahora, ¡gracias por ayudarme a corregir mis errores!

Me pongo a andar. Os invito a que paséis al próximo capítulo, en el que veremos al Hades en acción.

01. Hadeico

Iniciamos la andadura de nuestra aventura. En el capítulo anterior, introductorio, había esbozado las líneas generales que van a enmarcar nuestro caminar. Ahora ya no queda más que ajustarse las botas y husmear por el escenario. Comencemos por el inicio:

Se hizo la Tierra y la Vida. De 4.570 a 3.800 millones de años

La Tierra primitiva, eón Hadeico (también llamado Hádico o Hadeano), duró aproximadamente desde hace 4.570 hasta hace 3.800 millones años, es decir, un 16% de la vida de la Tierra, y fue un eón de formación y asentamiento. En la mitología griega Hades, de donde recibe el nombre este eón, alude al antiguo inframundo, la neblinosa y sombría morada de los muertos. Y realmente la Tierra en aquellos años se perdía en la niebla de lo desconocido, del calor y la confusión, como un infierno catastrófico y en llamas.

Hablaremos en este capítulo y siguientes de cómo apareció la Vida a partir de los más elementales átomos, incrementando su complejidad y cooperación, hasta la preservación de la información, replicación y transmisión de la misma. Hablaremos de los entornos donde surgió y donde, protegida, prosperó en forma de una primera célula procariota, la ancestral eubacteria.

Durante este período, probablemente, el Sistema Solar se estaba formando dentro de una gran nube de gas y polvo. En su centro se iba condensando la mayor parte de la materia que la constituía, al final un 98,8% del vecindario. La gran presión gravitatoria de esta masa encendió el horno del Sol, expulsando radiaciones que barrían los elementos más ligeros de sus proximidades, dejando sólo a los pesados, empujándolos hacia el espacio hasta encontrar una posición más cómoda. Allí, en cuatro zonas muy concretas, pudieron ya aglutinarse de acuerdo a los grumos que la gravedad iba formando. Se estaban gestando los gigantes de gas Júpiter y Saturno, y los de hielo Urano y Neptuno. Próximo a ellos, ya

suficientemente lejos del calor de la protoestrella central, hacía el suficiente frío (tanto que se le llama la "línea de hielo") como para que sobre las motas de polvo de aluminio o de silicio que por allí se movieran pudieran congelarse poco a poco las moléculas de agua, metano y dióxido de carbono, formando cuerpos helados de todos los tamaños.



Representación artística de cómo pudo ser la acreción del sistema solar, con el Sol central, la franja interior de planetas rocosos donde se estaba gestando la Tierra y la exterior de planetas gaseosos y helados (Wikipedia, dominio público)

El volumen tremendo de los cuatro planetas gaseosos impuso su orden: absorbieron a los pequeños cuerpos, y a los que no pudieron los fueron barriendo del mapa arrojándolos al espacio exterior, en donde quedaron como viveros de los futuros cometas que se acercan de vez en cuando al Sol, o bien los impulsaron contra los protoplanetas rocosos interiores entre los que se encontraba lo que sería la Tierra, que se iba transformando poco a poco en un cuerpo independiente a medida que absorbía parte de esta materia y la de la nube de gas y polvo inicial. Habían pasado los 100 primeros millones de años de nuestro sistema solar.

Nuestra visión se aclara si en aquel caos hacemos foco sobre los "ladrillos" con los que se contaba en el proceso de gestación de la Tierra.

Por un lado, los gases, entre los que dominaba desde el "Big Bang" el *hidrógeno*, H_2. A continuación el *helio*, He, inerte, y posiblemente los resultantes de la reacción del cuantioso hidrógeno con el resto de participantes según su abundancia: oxígeno, nitrógeno, carbono, azufre… (*agua*, H_2O; *amoniaco*, NH_3; *metano,* CH_4; *sulfuro de hidrógeno*, SH_2). La creciente radiación ultravioleta disociaría progresivamente el amoniaco, dando *nitrógeno*, N_2; y el metano, dando *dióxido de carbono*, CO_2.

Si nos fijamos ahora en los sólidos, se trataría de *metales* y *silicatos metálicos*. Los elementos sólidos más pesados, silicio, hierro, níquel, magnesio… estaban presentes, pero con unos porcentajes muy pequeños.

No obstante había lo suficiente como para que reaccionaran entre ellos. La base la constituyó el silicio, que se combinó con el oxígeno. El óxido de silicio (SiO_2) se combinó con otros elementos formando los silicatos que predominan, hasta hoy, en el manto y la litosfera terrestre.

Estos eran los ingredientes de la mezcla en la batidora inicial.

Apretamos el ON y…

Hay varias teorías sobre la formación de la Tierra, pero la que parece tener más adeptos, y de la que hemos dado ya una ligera pincelada, es la de la *acreción* (agregación de materia a un cuerpo) *heterogénea*, es decir, toda la materia que al final conformó la Tierra provenía de la nebulosa primigenia, ya como materiales simples próximos al núcleo inicial de atracción gravitatoria o bien como cuerpos de gran volumen captados por la cada vez más grande masa que iba compactándose. En definitiva: un planetesimal más dentro del conjunto de los que se iban formando en el incipiente sistema solar.

A lo largo de este proceso de acreción, la masa que se iba formando se fue calentando por el choque de los cuerpos que se unían al núcleo central y el calor de la desintegración de los

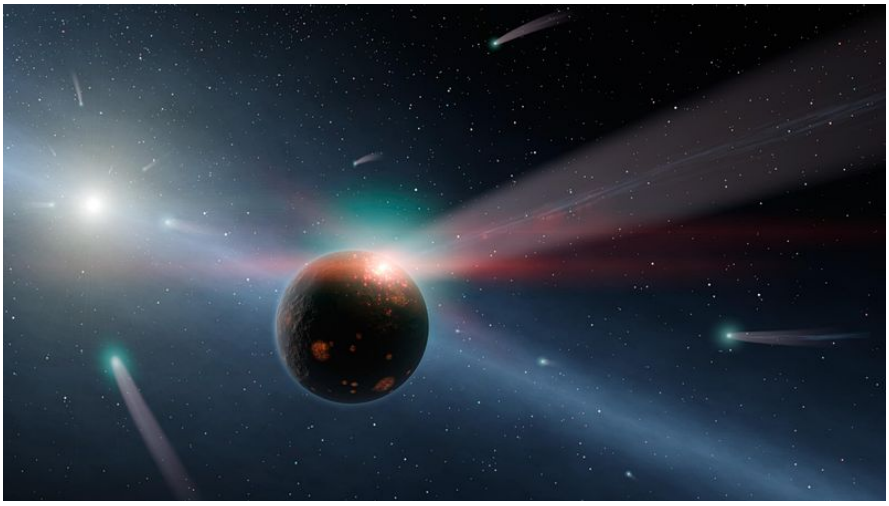
elementos radiactivos que se iban captando, lo que hacía que se elevara considerablemente la temperatura del conjunto. Esta altísima temperatura hizo que comenzara a fundirse el hierro (lo que se conoce como **gran acontecimiento térmico**), ya que es menos refractario que los silicatos y tiene mayor densidad, comenzando a viajar por su gran peso hacia el interior, arrastrando al níquel.

A lo largo de este viaje la presión producida por el peso de los materiales que iban quedando por encima incrementaba aún más la temperatura. Así fue que mientras aún se iba formando la Tierra, su **núcleo** comenzó a tener entidad propia. Según el geofísico de la Universidad de París Claude J. Allègre, eso sucedía probablemente hace unos 4.440 a 4.410 millones de años, cuando aún la radiación solar barría los volátiles de la incipiente atmósfera.

Mientras, los silicatos (que en la actualidad conforman el 95% de la corteza terrestre) quedaban en las capas exteriores formando el **manto**. Se supone que, a pesar de la intensidad energética del momento, estos silicatos nunca llegaron a un punto de fusión total y generalizada en toda la Prototierra, lo que hubiera formado un gran océano de magma. Si hubiera sido así se hubieran sedimentado según densidades, no habiéndose encontrado en la actualidad ninguna evidencia de este fenómeno.

En paralelo, el bombardeo de materia exterior seguía y, a medida que iban chocando más cuerpos atraídos por la *Prototierra*, éstos se iban fundiendo, adquiriendo sus componentes la dinámica general del conjunto. Muchos de estos cuerpos serían los cometas impulsados por las fuerzas gravitatorias de Júpiter, los cuales aportaban al planeta Tierra agua y dióxido de carbono, e incluso alguna molécula orgánica. El calor era tremendo, y más tras cada uno de los tremendos choques, de forma que el agua que había condensado en protomares se evaporaba una y otra vez.

Un escenario realmente del Hades, como lo imaginó el artista en la imagen siguiente:



El Hades imaginado por el artista (NASA, dominio público)

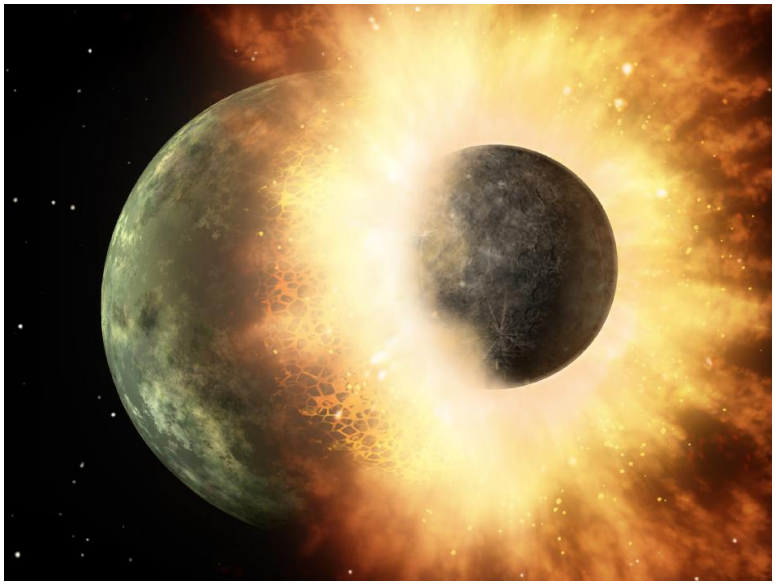
Mientras todo esto sucedía, los elementos gaseosos y más volátiles, dadas las altas temperaturas que existían, iban permeando las capas sólidas y saliendo al exterior. En realidad, en un principio la gravedad no era suficientemente grande como para que estos gases pudieran ser retenidos formando una atmósfera inicial. La Prototierra tuvo que esperar hasta tener un 40% de su masa actual para poder crear una primera atmósfera: aproximadamente con este tamaño fue capaz de retener el H_2O y a partir de aquí, a medida que iba creciendo, los gases y volátiles pesados. Los más ligeros, entre otros el H_2 restante o el He, fueron barridos por el viento solar. Se estaba generando la **protoatmósfera terrestre.**

Hay varias hipótesis sobre la composición de esta atmósfera primitiva. La más antigua consideraba que la abundancia inicial del hidrógeno conllevaría una atmósfera de carácter reductor, con abundancia de vapor de agua (H_20), amoniaco (NH_3) y metano (CH_4), como así sucede en otros planetas. Sin embargo, actualmente, y según el estudio de las rocas más antiguas (3.900 millones de años), se piensa que su composición sería muy parecida a la actual, aunque sin oxígeno. En esta atmósfera, provocada en gran medida por las emisiones volcánicas, que tuvieron que ser semejantes a las actuales, dominarían el CO_2, el SO_2 y el H_2O, a los que se añadiría el agua de la evaporación de los océanos y el nitrógeno. Por tanto no tendría un carácter reductor,

sino más bien neutro. Aunque, bien pensado, ¿pudo una atmósfera ser continuación de la otra?

De un cielo neblinoso y espeso, tétricamente iluminado, a través del cual apenas se podrían ver las estrellas, caía el infierno: el bombardeo seguía. Nunca se detuvo. Se cree también que cuando la Prototierra llegó al 60% de su tamaño tuvo lugar el episodio de formación de la Luna debido al choque de la entonces Tierra con otro cuerpo del tamaño de Marte, **Theia**, la mitológica madre de Selene. Este segundo cuerpo o bien se formó en el mismo disco de acreción de la Tierra o fue un cuerpo captado por la gravedad de la Prototierra.

El hecho de que los materiales de la Tierra y la Luna sean muy parecidos hace pensar que lo que debió suceder con más probabilidad fue lo primero, cuando en uno de los puntos de Lagrange -puntos de equilibrio gravitatorio en un sistema con dos masas principales, en este caso el Sol y la Tierra- situado sobre la órbita de la Prototierra, fue concretándose un tercer cuerpo, Theia, que por alguna inestabilidad provocada al ir acumulando más y más materiales, llegó a precipitarse sobre su compañero de órbita.[1]



Representación artística del choque entre la Tierra y Theia (NASA, dominio público)

La enorme energía del choque produjo una elevación de la temperatura, con fusión y expulsión de los materiales licuados y volátiles. Los primeros quedaron orbitando el cuerpo principal, creando una atmósfera de rocas vaporizadas alrededor del joven planeta, mientras que los volátiles quedaron expuestos a la dinámica de la atracción gravitatoria y de los vientos solares; la mayoría se perdieron en el espacio. Los sólidos fundidos en órbita sobre la Prototierra formaron un nuevo disco de acreción independiente y, por fin, la Luna. En este proceso, la Luna quedó con un mínimo de volátiles, tanto libres como embebidos en su masa sólida. De ahí, se supone, la inexistencia de una atmósfera en ella.

El bombardeo seguía, aunque cada vez más mitigado al irse agotando el material libre disponible. El núcleo se iba conformando. La protoatmósfera se iba recuperando tras el choque lunar a partir de los gases y volátiles que exudaba el manto residual de la tierra.

A pesar de todos los fenómenos catastróficos que eran habituales en aquella edad de la Prototierra, **ésta se iba enfriando**. Inicialmente se hallaba prácticamente fundida en su totalidad debido a la creciente presión interna de su propia gravedad, ya que iba acumulando más y más material que venía del espacio exterior, todo ello unido a las aportaciones de energía calorífica de choque que se generaba en su caída violenta sobre la superficie del planeta. Es lógico el pensar que los efectos del gran acontecimiento térmico que la había fundido en su totalidad se iban poco a poco atenuando, al compás de la propia atemperación de estas circunstancias debido al agotamiento progresivo de la “basura espacial”.

Las desintegraciones de los elementos radiactivos en el manto y las deformaciones plásticas de su masa producidas por el estira y afloja de las mareas solares y lunares apoyarían también el calentamiento. Cuando el reloj iba por los cien millones de años, el espectáculo debía ser tremendo, con la Luna dando una vuelta a la Tierra cada cinco días y tres o cuatro veces más cerca de lo que lo

hace ahora. Imaginemos qué tremendos tsunamis causaban las mareas. Sin embargo, también estas fuentes de energía iban menguando, al irse consumiendo los elementos radiactivos de menor vida media y al alejarse la Luna de la Tierra, ya que, desde su aparición, se veía continuamente frenada en su girar alrededor de su planeta agarrada por los anclajes de la inducción de mareas entre ambas. Como dos niños que giran cogidos de las manos, cada uno conteniendo el giro del otro.

Por otro lado, la energía solar recibida iba en aumento, a pesar de que en aquella época era muy inferior a la actual, un 30% menos, puesto que, a medida que en el Sol se iba produciendo helio a partir de la fusión del hidrógeno primitivo, se iba incrementando su eficiencia energética. No obstante, este incremento no era suficiente para saldar los procesos de enfriamiento por las causas mencionadas en el párrafo anterior.

Como consecuencia de todo ello, la Tierra iba perdiendo temperatura. Su motor de cambios, aunque aún potentísimo, se iba atemperando.



Dinámica en la formación de la litosfera en el Hadeico (elaboración propia a partir de "Origen e historia de la Tierra", F. Anguita Virella, fair use)

El núcleo interno se solidificó quedando aún una parte líquida que lo rodeaba. El núcleo líquido tenía dos caraterísticas especiales. Era

magnético, al estar constituido principalmente por hierro, y además estaba en movimiento, arrastrado por el giro del planeta al que se superponían los inevitables flujos convectivos en un mundo líquido y caliente. El campo magnético producido por este movimiento de cargas interactuaba con el propio núcleo en movimiento, induciendo corrientes que reforzaban el campo magnético inicial. Este proceso continuó y continuará mientras no cese la rotación terrestre, manteniendo una magnetosfera protectora y decisiva para el desarrollo de la Vida en el planeta, ya que constituye un eficaz escudo contra las radiaciones solares y cósmicas.

Mientras, en el manto fundido (océano subterráneo de magma), que también se iba paulatinamente enfriando, se producían corrientes convectivas que transportaban material desde el fondo hacia la superficie. En aquellos puntos donde había una mayor fuente energética interna calentando el manto se producía una mayor corriente vertical de material, y por tanto una mayor aportación a la superficie del planeta. Esta acumulación de material teóricamente produciría un punto frío –menos caliente- en la superficie, lo que permitía que se fuera solidificando, apareciendo pequeños cratones de corteza (masas de tipo continental), posiblemente hace ya 4.400 millones de años, con una dinámica muy activa, ya que o bien recibían más materiales a través de procesos volcánicos, o flotarían y se subducirían otra vez en el manto magmático, o bien serían destruidos por el alcance de un cuerpo espacial exterior. En aquel momento la litosfera era sumamente cambiante y se cree que hace 4.200 millones de años ya se había formado una capa sólida recubierta por materiales que formaban su corteza.

La protoatmósfera también se iba enfriando. Era muy densa, mucho más que la actual; por eso su presión era bastante elevada, lo que permitió, a pesar de la alta temperatura, la condensación del agua y la aparición de la lluvia desde un momento muy temprano (hay diversas opiniones que se mueven entre los primeros 20 millones de años de la vida de la Tierra y hace 4.300 millones de años). Así se formaron los **primeros protoocéanos**, cálidos -entre 30º y 70ºC- dada la temperatura del manto y de la atmósfera;

y aunque hay diversas opiniones sobre ello -que oscilan entre pH's de 4 a 10- se supone que ligeramente ácidos por la disolución del CO_2 atmosférico -proceso por el cual este gas disminuyó en gran medida su presencia en la atmósfera- y con una salinidad mayor que en la actualidad.



Representación artística de los primeros océanos. La Luna muy próxima a la Tierra en esos momentos. La configuración de cráteres corresponde a la actual (imagen: David A. Aguilar, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, fair use)

A finales de este eón se produjo el bombardeo tardío [2] que afectó a los planetas interiores del Sistema Solar, hace de 4.000 a 3.800 millones de años. Se piensa que este bombardeo fue el coletazo final de la transición entre la era inicial de formación de planetesimales y un escenario semejante al actual: el último arrastre efectuado por la gravedad de los planetas definitivos sobre la basura planetaria remanente en aquel momento. Otras teorías [3] especulan sobre la posibilidad de que este episodio hubiera sido producido por migraciones de Júpiter y Saturno dentro del sistema solar que desestabilizaron al Cinturón de Kuiper,[4] lo que hubiera llevado a multitud de cuerpos pequeños a caer a la órbita interna del Sistema Solar.

Este bombardeo tardío destruyó la mayor parte de las rocas primigenias. La corteza litosférica que vemos hoy, con algunas

excepciones muy contadas, es bastante más joven que la edad de este período.

De hecho, en la actualidad no hay muchas evidencias de rocas de esta época. Los **minerales más antiguos** [5] que se conocen tienen una antigüedad de aproximadamente **4.400 millones de años** y se localizan en Australia. Se encuentran incrustados en otro tipo de rocas, distintas a las de su formación, tras un viaje geológico de subducción, cohabitación en el magma y vuelta a resurgir. Se tratan de circones (silicato de circonio, $ZrSiO_4$). Por lo que conocemos del proceso de generación de circones, necesariamente se debieron producir en aguas someras y templadas, de donde podemos imaginar que en un momento muy temprano de la vida de la Tierra ya había corteza litosférica y océanos templados.

Para encontrar **rocas arcaicas** hay que esperar a las que se formaron unos millones de años después, subproductos de la cocción en la chocolatera magmática que era la Tierra por aquellos años, recubierta de costras cambiantes. Los meteoritos caían por doquier, destruyendo lo poco sólido que se iba formando. Sin embargo, algo ha perdurado hasta nuestros días. Hasta hace poco las **muestras más antiguas de rocas** de este eón se encontraban en el noroeste de Canadá y tenían una edad de 4.030 millones de años. Se tratan de gneises, rocas de origen magmático sometidas a un proceso de metamorfosis muy rápido. Sin embargo hoy se conocen nuevos datos correspondientes a rocas situadas en el cinturón de Nuvvuagittuq, en la costa este de la bahía de Hudson, en Québec, **datadas en 4.280 millones de años, cuando la Tierra apenas tenía 300 millones de años.**

Como hemos comentado, habría que esperar a la finalización del episodio del bombardeo tardío para que la litosfera comenzara a estabilizarse. Inmediatamente tras el fin de este apocalipsis encontramos las **formaciones rocosas más antiguas**. Son rocas sedimentarias (confirmando la existencia de mares profundos en donde se acumularon los sedimentos) de hace **3.800 millones de años** que se encuentran en Isua, Groenlandia, e incluyen ya

formaciones de **hierro bandeado**, si bien la mayoría de estas últimas se producirán más tarde, entre 2.500 y 1.800 millones de años.

Las **formaciones de hierro bandeado** son rocas sedimentarias que contienen al menos un 15% de hierro en forma de óxidos y presentan una estructura formada por bandas, estando unas compuestas por el hierro, y las otras por sílex (SiO_2) descompuesto. Son consecuencia de un proceso lento y progresivo de oxidación del hierro disuelto en los mares ácidos del Hadeico bajo la acción del incipiente oxígeno de aquella época.



Hierro bandeado (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 generic)

Sorprendentemente, al mismo tiempo que se estaba produciendo el bombardeo meteorítico masivo parece que **surge la Vida**. Dada la relación de los isótopos del carbono C^{12}/C^{13} en las rocas de Isua, se especula con la posibilidad de que ya en su momento -3.800 millones de años- hubo vida. El C^{12} es preferido por los organismos vivos al ser más ligero y, por tanto, exigir menos energía su manejo. Podría tratarse de organismos con un metabolismo qimiolitoautótrofo.[6] Apoyaría la teoría el hecho de que los **fósiles más antiguos** conocidos se han encontrado (2017) en las rocas de Nuvvuagittuq Supracrustal Belt en Quebec, Canadá, datadas **entre 3.770 y 4.280 millones de años** desde hoy.

En base a lo dicho en el párrafo anterior podemos conjeturar. La Tierra se engendró hace unos 4.570 millones de años, los primeros mares debieron aparecer, si hacemos caso a los zircones, hace 4.400 millones, y la primera evidencia de posible Vida es de hace unos 3.800 millones, o quizás anterior, según lo que nos cuentan las rocas de Isua. Como las formas de vida que conocemos necesitan sí o sí agua líquida, parece que se tuvo una ventana de unos 600 millones de años para probar y tener éxito. Todo ello tamizado por un ambiente totalmente inhóspito, con un vulcanismo intenso, un cielo cargado de bombas amenazantes, abundantes aguas termales, sin oxígeno y expuesto a letales radiaciones solares.

En 2015 surgió lo que puede ser una de las grandes sorpresas en el conocimiento de la Vida, ya que gracias a un estudio [7] de circones detríticos procedentes de la región australiana de Jack Hills, datados en hace 4.100 millones de años, se ha podido detectar en su interior la existencia de inclusiones de grafito con una proporción entre isótopos de carbono C^{12}/C^{13} coherente con la existencia de vida. Un paso atrás de ¡300 millones de años!

Hay incluso otras opiniones más extremas que estiman que la Vida pudo quizás aparecer con anterioridad, en una edad de la Tierra de pocas decenas de millones de años, lo cual es un tiempo muy reducido en comparación al que se había estimado anteriormente. De todas formas, da la impresión de que la Vida fue un suceso con una alta probabilidad.

A través de diversos estudios como el llevado a cabo por Gerald F. Joyce,[8] se ha comprobado en el laboratorio cómo las moléculas, cuando forman una población de un sistema químico, presentan una clara tendencia dinámica de actuación entre ellas, de forma que siguen principios que creíamos patrimonio de la biología: competencia por la materia prima, mutación espontánea, selección según eficacia, colaboración rayando en la simbiosis,… ¿parece cómo si estos principios fueran una ley general que actúa en la

naturaleza, haciendo indistinguible química y biología, que quedarían separadas solamente por su grado de complejidad?

En éste contexto lógicamente debemos pensar que antes de que se produjera el primer atisbo de Vida en la Tierra se debió organizar algo semejante, aunque extremadamente simple, en un mundo dirigido por la química no orgánica. En el escenario al que se llegó se moverían múltiples moléculas cada vez más singulares, con unas interrelaciones entre ellas que progresivamente se irían haciendo más complejas, capaces de cambiar su estructura, transmitir estos cambios y retroalimentarse: es decir, un atisbo de metabolismo, replicación y herencia.

Hay que partir de que la probabilidad de que esto sucediera en un salto o en unos pocos saltos es menos que mínima. Pero si imaginamos el camino de la complejidad dividido en un sinfín de pasos infinitesimales encadenados, una especie de inapreciables *saltitos progresivos en zigzag*, la cadena completa, aún teniendo una baja probabilidad de ocurrencia, la tendrá mayor que el cambio en un salto. El truco está en que la selección natural juega con los dados marcados, que impiden muchos de los infinitos posibles caminos en zigzag entre las posiciones de inicio y final. La dificultad incluso se aminora si pensamos en que la baja probabilidad juega a lo largo de un periodo temporal muy alto, del orden de cientos de millones de años, y que no hubo solamente una pista de pruebas, sino quizás millones de ellas sobre todo el planeta.

Partimos también de que la unión entre moléculas, como comentaremos más tarde, es un hecho relativamente fácil, regulado por las leyes físicas y termodinámicas que controlan sus "existencias", y que están en el Universo desde que existe, actuando sobre todo, guste o no guste. En una gran mayoría de las uniones químicas se necesita una energía de cebado para sintetizar moléculas complejas a partir de elementos o moléculas más simples. Y se necesita un lugar "confinado", donde las concentraciones de sus disoluciones sean muy elevadas, para

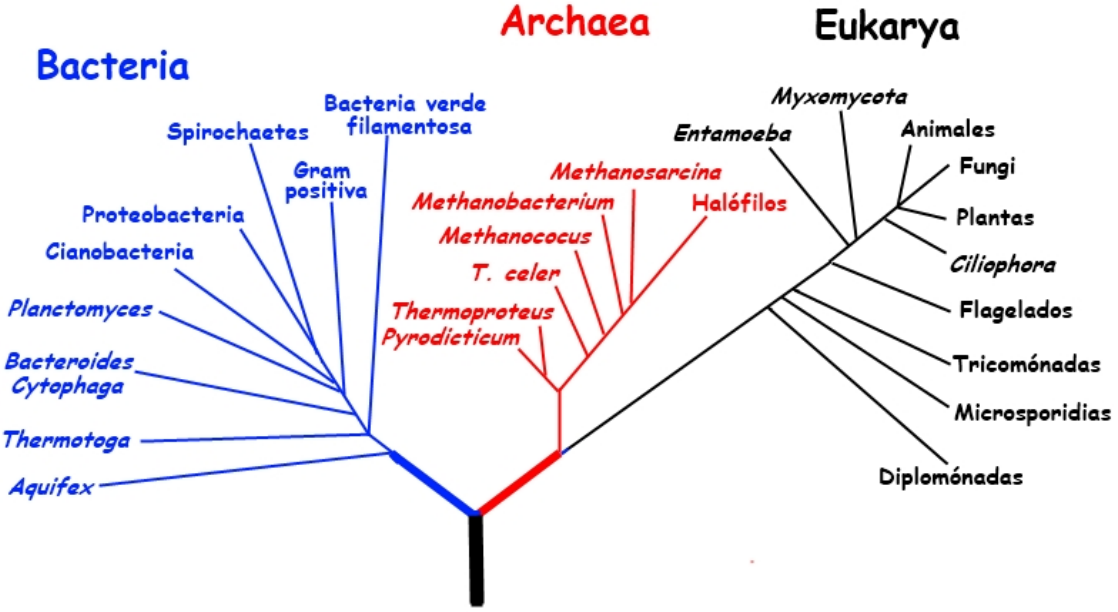
permitir el encuentro fácil entre moléculas que acabarán uniéndose. Sobre la Tierra primigenia podíamos encontrar las circunstancias adecuadas: piezas para ensamblarse, agua para diluir y facilitar su movimiento, energía para salvar las dificultades de un enlace si éste es el caso y emplazamiento adecuado para que todo suceda. Un poco como en la probeta del químico.

Entonces interviene el "azar" probabilístico, al que le llamaremos *fuerza evolutiva*. En el zigzag del cambio unas posiciones resultaban más ventajosas que otras. Pensando en que la química de entonces era exactamente igual a la de ahora no es difícil imaginar que los volúmenes poblacionales de los ladrillos de la Vida que se iban formando espontáneamente en la naturaleza, pasito a pasito, se iban acomodando en el escenario en base a sus intrínsecas condiciones de éxito: el que se sintetizaba con más rapidez se extendía más, copando así la materia prima que cada vez se iba haciendo más escasa en el mundo primigenio. Los primeros nuevos polímeros que consiguieron una adecuada estructura física tridimensional, en cuanto a forma geométrica y composición química, así como de reparto de cargas electromagnéticas que facilitasen su recombinación, tendrían más éxito en un mundo cada vez más carente de medios.

Los polímeros que encontraron más rápidamente interrelaciones con otros que activaban mínimamente su velocidad de polimerización, o aquellos que iniciaron un camino con promesas de novedades, por fuerza tendrían que ser más exitosos en el entorno donde se encontraran, ya que tenían más "boletos" premiados en la carrera para copar el espacio "existencial". Los polímeros que antes encontraron un indicio elemental de replicación, aún imperfecta, abrieron una nueva dimensión para colonizar el medio. Podemos decir, como sabemos hoy en día, que acababan de iniciar el camino necesario por el que poco a poco iban a construir la biosfera.

Estos procesos y otros más pueden ser rastreados al estudiar los *minisaltos en zigzag* siguiendo un camino de ida y vuelta:

Partiendo de la sólida base de las características comunes del metabolismo y reproducción-herencia que conocemos en los seres vivos actuales, en busca del antecesor común vivo más antiguo -el LUCA, "Last Universal Common Ancestor", del que hablaremos más tarde- para, una vez llegado a él, rescribir un camino de vuelta, reconstruyendo de nuevo la película viendo cómo se abre progresivamente el abanico hasta la realidad de hoy. Un abanico que creemos pueda ser como el que dibuja la imagen siguiente.



Unos miles de millones de años después de LUCA, habitante de la raíz más profunda del árbol de la Vida (Wikimedia, dominio público)

Mucho se conoce de esta aventura y mucho se basa en hipótesis más o menos bien fundamentadas. Es muy difícil reconstruir la cadena, casi imposible, pero lo que sí será siempre cierto es que la curiosidad humana estará continuamente imaginando e intentando demostrar la veracidad de los posibles eslabones. Nos anima el hecho de pensar que, si fueron una realidad a pesar de su baja probabilidad, también contaremos con una mínima probabilidad de reproducir sus etapas en el laboratorio.

En los seres vivos contemporáneos, ya sean animales, plantas, hongos o bacterias, hay una serie de elementos biológicos que son

comunes, a pesar de que aparentemente no tenemos nada que ver unos con otros. Es decir, **elementos biológicos básicos que son comunes en la Vida**. Conocemos también bastante bien, o al menos creemos que esto es así al sentirnos apoyados por las muy serias herramientas de la ciencia y la tecnología, cómo es la ramificación básica del árbol de la vida. Discutiremos sobre detalles… pero no sobre el fondo de la cuestión. De forma que todos estamos de acuerdo, por ejemplo, en que los seres eucariotas aparecieron con posterioridad a los procariotas, y que dentro de estos las eubacterias son anteriores a las arqueas, y por tanto forman lo que parece ser los organismos vivientes más antiguos de los que tenemos conocimiento. E inferimos que en aquellos eones iniciales las bacterias no debían ser muy diferentes a las actuales bacterias, ya que su forma de vivir ha demostrado ser una solución exitosa en un caldo medioambiental cambiante a lo largo de los últimos ¡¡3.800 millones de años!! Lo mismo podemos inferir, aunque a una escala temporal más corta, de otras parcelas de la Vida, como por ejemplo la existencia del huevo amniota que permitió a ciertos animales vivir sobre la tierra sólida y seca: una buena solución en su momento que aún mantiene su vigencia. Podemos pensar también que un "alguien ancestral" inventó el primer paso hacia el óvulo aislado y húmedo, alguien en cierto sentido con una bioquímica, en lo referente al huevo, no muy diferente a la de los actuales animales con los que comparte el singular invento.

Es decir, confiamos con una cierta garantía de certeza en que *determinados aspectos básicos de la biología que son compartidos por diversos seres vivos ya eran propios de antecesores comunes*. Y así encontraremos una serie de características, que de forma general son comunes en toda la biota actual, que provienen de un ancestro primigenio, y que como un testigo han pasado de mano en mano, de generación en generación, a través de los eones.

Todos los seres vivos compartimos la estructura del genoma: Un ADN-ARN formado por una cadena de pares de nucleótidos muy concretos. Compartimos también el mecanismo de replicación de

estas cadenas, y compartimos el mismo código genético que permite traducir su información en cadenas de aminoácidos que forman las proteínas.

Todos vivimos en base a un software idéntico, el ADN, y un hardware basado en los mismos elementos: proteínas. El software está parcelado en genes, de distintos tipos y diversos cometidos, con diversas interrelaciones operativas entre ellos: tipos, cometidos, interrelaciones y operaciones compartidas casi hasta el detalle por todos los seres vivos. Los genes de la segmentación actúan de igual forma en todos los animales, e incluso se encuentran también en animales no segmentados. El hardware lo forman las proteínas, y las que son compartidas por organismos diferentes ejecutan en ellos prácticamente las mismas funciones. Los fosfolípidos de las células ejercen idénticas funciones en la constitución de sus membranas, sean las células que sean.

Las formas de conseguir la materia prima para que nuestros organismos perduren vivos son variadas, aunque en su mayoría representan la misma estructura de metabolismo. En cuanto a la forma de procesar esta materia prima, es muy semejante.

La energía necesaria para cebar el fuego de la vida y hacer que continúe se obtiene de forma variada, aunque con estrategias comunes muy concretas. Después de conseguida la energía desde el exterior, por regla general las bacterias la almacenan en forma de molécula ATP, el adenosín trifosfato, como las píldoras energéticas que su metabolismo irá usando según necesidades. Al igual que lo hace una vaca, o una secuoya. El procedimiento de fabricación del ATP esta basado en un desequilibrio de protones entre ambos lados de una membrana celular, procedimiento que es general en todos los seres vivos. Incluso el primer paso de este proceso tan universal, antes de almacenar la energía en los enlaces del ATP, es utilizado directamente en el metabolismo de seres elementales.

La bioquímica de todas las formas vivas conocidas sobre la Tierra está basada en el carbono, y sólo en el carbono. Los oligoelementos

constituyentes mayoritarios son los mismos en todos los organismos vivos, carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno… Las biomoléculas presentes son idénticas, azúcares, proteínas, ácidos grasos… El 90% de la materia celular está compuesta por unos pocos representantes de estas biomoléculas, escasamente cincuenta.

Así que, a lo largo de este viaje de inmersión en el tiempo y la química orgánica en la búsqueda del origen de la Vida, encontramos identidades ya a partir de los escalones más elementales. Ahí deben estar sus orígenes. **Ahí debemos buscar**. Ahí estarán las piezas fundamentales, ahí las "probetas" en donde se diluyen y encuentran, ahí donde la energía se aprovecha, ahí es donde están las estructuras que se ven empujadas por las fuerzas evolutivas, donde se ubican las plantillas en las que se ajustan y replican, donde al final encuentran la autosuficiencia necesaria para mantener el motor individual y de especie en marcha, en plena libertad.

¡¿A qué esperamos para iniciar la búsqueda?!

En el próximo capítulo veremos las bases teóricas, algunas de ellas muy simples y conocidas, en las que se anclan los inicios de las moléculas orgánicas.

NOTAS CAPÍTULO 01:

1. Para saber un poco más sobre los puntos de Lagrange os animo a leer la entrada del blog hermano El Tamiz, "*El Sistema Solar - Los asteroides troyanos de Júpiter*", o esta otra, del blog Astrofísica y Física, "*Theia: muerte de un planeta, nacimiento de una luna*", que habla de las inestabilidades.

2. Una vez más os llevo a una entrada del blog El Tamiz, "*El Sistema Solar - El período de intenso bombardeo tardío*", para ampliar lo que sea eso del bombardeo tardío.
3. Recogidas en un artículo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, "*Un bombardeo de asteroides y cometas dio origen a las atmósferas de la Tierra y Titán hace 3.900 millones de años*" (abril 2011).
4. El cinturón de Kuiper es un disco circunestelar que orbita alrededor del Sol a una distancia de entre 30 y 55 veces la distancia entre el Sol y la Tierra. El objeto mayor conocido que orbita en este cinturón es el planeta enano Plutón.
5. Podéis ver más al respecto en este artículo, "*Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography*", John W. Valley et al., publicado en la revista Nature de julio de 2013.
6. Veremos en el capítulo 08 futuro qué es lo que significa esto.
7. "*Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircón*", Elizabeth A. Bell et al., que se publicó en la revista PNAS de septiembre de 2015.
8. "*Niche partitioning in the coevolution of 2 distinct RNA enzymes*", Sarah B. Voytek y Gerald F. Joyce, publicado también en la revista PNAS de marzo de 2009.

02. Algunas generalidades

En el capítulo anterior hablamos del escenario en donde se iba a desarrollar el drama. La Tierra comenzaba su andadura. Acabábamos planteando un hilo argumental sobre los puntos de encuentro de todos los organismos vivos, hilo que iremos desarrollando en un futuro, aunque hoy aún nos moveremos por temas muy generales, incluso elementales para la gran mayoría, que encuadran el camino. En un primer bloque de este capítulo la química es la protagonista y en él pretendo no sólo complementar el conocimiento con la presentación de los actores elementales, las moléculas orgánicas, sino también dejar en la mente de todos los lectores la idea de que los juegos de la química elemental, que más tarde dio origen a la química orgánica, fueron unos procesos naturales, elementales y obligatorios. La bioquímica tuvo que aparecer sí o sí. En un segundo bloque de este capítulo seguiremos con el relato biográfico, profundizando un escalón más en los misterios del inicio, aún dentro de los 770 millones de años que duró el Hadeico.

De las profundidades de este eón, entre fuego y explosiones, a través de un agitado caminar hacia la estabilidad, surgieron como de la nada, empujados por las fuerzas universales, nuestro planeta Tierra, y sobre él una misteriosa Vida. En este momento de su biografía vamos a intentar desmadejar, en la medida de lo que el conocimiento actual nos permite, cómo sucedió todo.

En el capítulo anterior, introductoria del Hadeico, fuimos manejando muchas palabras nuevas, diferentes realidades moleculares y actores desconocidos, como no podía ser menos casi en el inicio de esta biografía. Hablaremos de todos tarde o temprano, empezando a continuación con los más elementales, que no por ello dejan de ser menos trascendentales, en los cimientos de esto que llamamos Vida. Sin ello puede quedar la tramoya ininteligible. Ahí va, pues, un poco de química.

La Vida pudo escoger a su viejo patriarca entre varios de los habitantes de la tabla periódica de elementos químicos. Pero eligió al Carbono.

Nuestro amigo el carbono

Y el Carbono organizó su trabajo echando mano de los elementos más abundantes del entorno que le rodeaba y que fueran compatibles con su especial "fenotipo" –su cara visible-: formaron el equipo de los bioelementos. [1] Todos ellos pueden unirse formando diversas asociaciones químicas, las moléculas. Un poco más abajo intentaremos desmitificar la "alquimia" de tales enlaces.

Así que la mayor parte de las moléculas que componen los seres vivos tienen su base en el **carbono**, el cual representa aproximadamente un 20% del peso de los organismos. Este elemento muestra una serie de propiedades muy diversas que derivan de su pequeño radio atómico y de que la capa más externa de su bagaje electrónico está formada por cuatro electrones que le dan una gran versatilidad y múltiples habilidades:

1. Ofrece una amistad universal: Su particular estructura de electrones le permite formar enlaces hasta con cuatro elementos distintos, lo que le da una increíble variabilidad molecular. A su vez estos enlaces pueden ser sencillos, dobles o triples, lo que quiere decir que puede agarrar con una, dos o con tres manos a la vez.

2. Sabe hacer fuertes amigos: Cuando se junta con otros elementos en una molécula, forma con sus compañeros enlaces de unión del tipo denominado covalente, que son muy estables y acumulan mucha energía.

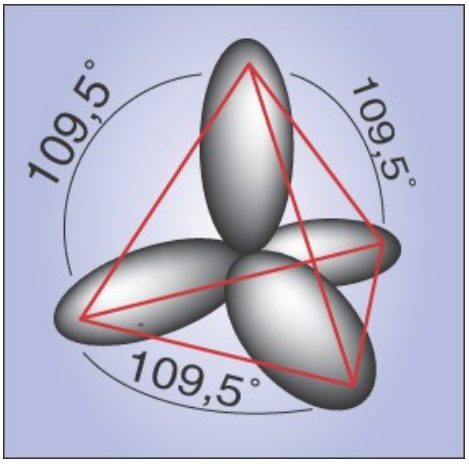
3. Su red social es potente: Es un elemento que puede formar largas cadenas lineales, planas o tridimensionales, ya que se puede unir fácilmente a otros carbonos. Por lo que iremos viendo a lo largo de estos primeros capítulos se entenderá la importancia que para el

metabolismo y la vida es el poder tener moléculas estructuralmente complejas.

4. Sabe amoldarse a las circunstancias: Los compuestos del carbono, aún siendo estables, no son inalterables y a la vez pueden ser transformados con facilidad en otros mediante reacciones químicas.

5. Sus facetas de comunicación son versátiles: Los compuestos del carbono no son solamente sólidos, sino que al unirse al oxígeno los forma gaseosos.

Quizás por todo ello fue el preferido por la Vida.



Los cuatro orbitales electrónicos más externos del átomo de carbono. En el centro, el núcleo atómico (Wikimedia, GFDL 1.2)

El principal aliado del carbono en la aventura de la vida es la molécula del agua: H_2O. El agua es el disolvente perfecto, por lo que es esencial en el mantenimiento de un medio en donde las moléculas químicas puedan moverse e interrelacionarse. Su capacidad de disociarse fácilmente en forma de iones H^+ y OH^- le permite ser un excelente mediador en las reacciones de óxido-reducción esenciales en la dinámica de la Vida. Por otro lado, tiene una capacidad calorífica muy alta –absorbe bien el calor sin aumentar su temperatura- lo que estabiliza las condiciones biológicas en los organismos que funcionan mediante energéticas

reacciones químicas. Podemos comprender, por tanto, que su función es absolutamente esencial: sin agua no hay Vida tal como la conocemos. Esta molécula es la más abundante de los seres vivos y representa, en promedio, el 70% de su masa. Aunque hay algunos campeones: en las medusas puede alcanzar el 98% del volumen del animal, y en la lechuga, el 97% del volumen de la planta.

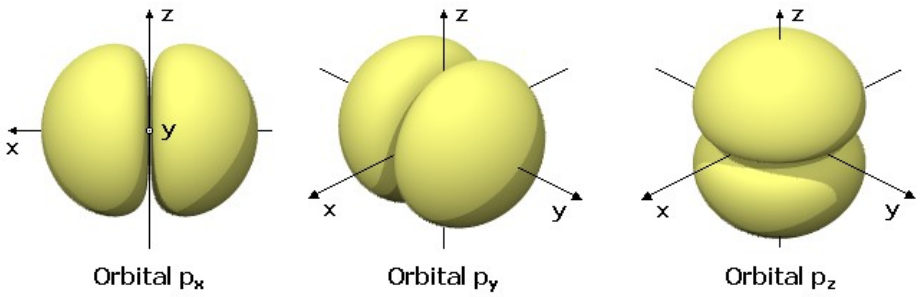
Un poco de química molecular

Me interesa ahora resaltar la estructura de átomos y moléculas, sus formas y tal como tienen distribuidas sus cargas eléctricas. Ya que, según sea, así se interrelacionarán formando compuestos, entre ellos los que se encuentran en la base de la Vida.

La imagen que voy a dibujar es la elemental de átomos y moléculas, aunque es tan sencilla que veremos cómo se parece a la de una pieza de "lego" imantada. Podemos imaginar a la química como una caja de versátiles piezas encadenables e intercambiables, gracias a la fuerza de atracción-repulsión de sus cargas eléctricas, que actúan sobre una pista de pruebas diseñada por las leyes físicas y termodinámicas universales del Cosmos.

Un átomo, y por extensión una molécula más compleja, son ínfimas, son aparentemente la nada. Pongamos una naranja en el centro de un campo de fútbol. Esta naranja es el núcleo del átomo, en donde los protones con carga positiva, su tarjeta de identidad, cohabitan con los neutrones. No esperemos encontrar a los terceros de la fauna atómica, los electrones, en el césped del campo de juego. Para ello tenemos que mirar más allá, por los confines del graderío de estadio. El número de este colectivo coincide con el de los protones del núcleo y con un valor de su carga negativa igual a la positiva de los protones, neutralizando así la carga total del átomo. Si la naranja es de un kilo, no espere más de un gramo de electrones revoloteando entre los asientos. Vacío. Un poco de materia, que es mucho, y una activa fuerza electromagnética.

Los electrones no revolotean como un sistema planetario a lo largo y ancho de perfectas capas superpuestas, como las de una cebolla, aunque esta imagen es bastante útil para imaginar la configuración electrónica de los átomos. Estas partículas se posicionan rodeando al núcleo de forma que comienzan rellenando su capa interior, menos energética, para una vez saturada con dos electrones llenar la siguiente hacia fuera con ocho y luego la siguiente hacia fuera, así hasta colocar una cantidad de pequeñas partículas negativas en un número igual al de los protones del núcleo. Pero las "capas de cebolla" tienen formas curiosas, como podemos verlo en la figura de más abajo que representa los orbitales electrónicos de la segunda capa. Cada electrón dibuja su propio orbital de acuerdo a sus características cuánticas y según su ecuación de onda. El resultado es una solución probabilística que no sólo podríamos imaginar como un lugar físico, sino el lugar físico *donde es más probable que encontremos al electrón*… ¡cosas de la cuántica! Y tienen la forma y tamaño que tienen, no otro, ¡más caprichos de la cuántica! Ahora podemos comprender el por qué del vacío del átomo: los electrones tienen que poder encajar sus orbitales en este espacio. Que además alberga a multitud de partículas virtuales surgidas del borboteo cuántico. Pero eso es otra historia. [2]



Ejemplo de cómo son los orbitales electrónicos de la segunda capa. Raritos ¿no? (Wikimedia, GFDL 1.2)

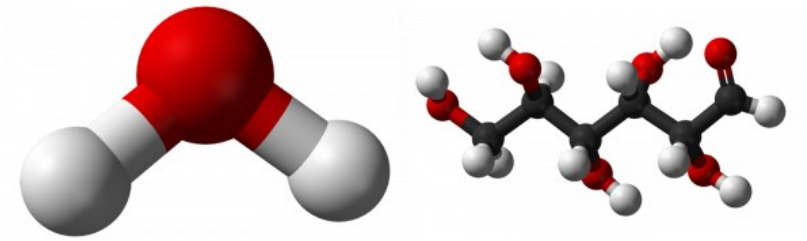
Es fácil entender que el átomo se relaciona con su entorno mostrando sus orbitales más externos –que no son más que las locas pistas de carreras de electrones con carga negativa-, los cuales actúan como tentáculos con los que formar moléculas. Pero

no hay que olvidar que en su pequeño punto central se encuentran los protones con sus cargas positivas, que condicionan la energía y el movimiento de los electrones, es decir, condicionan las características de los orbitales sus formas y fuerzas.[3] Todo ello hace que cada átomo se comporte como un pequeño imán, una pequeña pieza de lego imantada, con los brazos –algo así podemos entender que son los orbitales aunque no es exactamente correcto- exteriores, que son los elementos de unión mediante los que las piezas hagan "clik". Y según sea su configuración, así se relaciona.

Los átomos, como todo en la naturaleza, tienden espontáneamente a buscar posiciones en un entorno energético "redondo", como una piedra que bajo la acción de la gravedad no para hasta encontrar su posición estable en el fondo del valle. El óptimo energético lo encuentran cuando en su capa externa hay tantos electrones como teóricamente sea posible. Algunos están cerca de este óptimo por exceso, les sobran unos pocos electrones, y otros por defecto, les faltan otros pocos. Y ahí es donde colaboran unos con otros prestándose electrones, de forma que los átomos lleguen a formar una molécula que a su vez tenderá a instalarse también en una posición energética "redonda".

A veces estas uniones son prácticamente espontáneas: las piezas de lego que participan encajan espontáneamente como anillo al dedo. A veces hay que darles un empujoncito para vencer la repulsión negativa entre sus capas externas, sólo hay que buscar un poco de energía para cebar la reacción. Su entorno también tiene algo que decir, ya que influye en sus movimientos y velocidades, sus trayectorias, sus energías cinéticas, etc, circunstancias todas ellas que condicionan el baile de aproximaciones y choques. Incluso hay otras moléculas que espontáneamente se ofrecen como casamenteras, las catalizadoras, agilizando de forma exponencial la formación de la nueva molécula. Si todo es favorable, y la probabilidad de que así sea no es que sea precisamente baja, se formará un enlace y una nueva molécula químicamente más estable: la segunda ley de la Termodinámica manda. La verdad es

que nuestra experiencia constata que la química de la naturaleza dispone para ello de un manual absolutamente versátil.



A la izquierda representación tridimensional de la molécula del agua (Wikimedia, dominio público) y a la derecha la de la D-glucosa (Wikimedia, dominio público). Las esferas representan los átomos: el carbono en negro, el oxígeno en rojo y el hidrógeno en blanco. Las barras entre átomos representan los orbitales moleculares, allí por donde aparece la densidad electrónica con mayor probabilidad.

Tras el anterior largo paréntesis teórico recojo argumentos y me concentro en la moraleja: ***la unión de átomos y la configuración de nuevas moléculas no es un acto de magia, sino un suceso que la naturaleza propicia***. Si las condiciones de entorno, pastoreadas por las omnipresentes leyes fundamentales y universales del Cosmos, son medianamente favorables, **sucederá sí o sí**. Y llegaremos a estructuras complejas como la del azúcar de la figura siguiente, o extremadamente complejas como la de la hemoglobina. Esta "involuntaria" dinámica llevó a los sorprendentes "imanes-lego" a construir la Vida. Y esto sí es una certeza para nosotros que estamos observando el final de la historia.

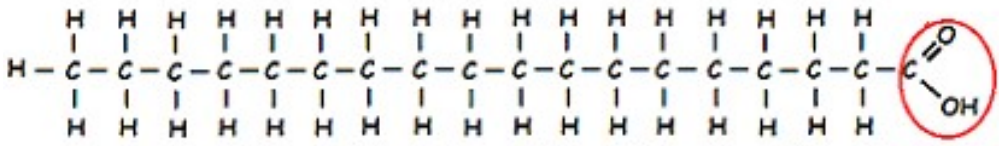
Continuemos ahora hablando, con nombres y apellidos, de los ladrillos con los que se ha ido montando el guión, ya en el ámbito de la bioquímica, ladrillos formados en su mayoría por carbono, oxígeno e hidrógeno. O quizás mejor, CO_2 y H_2O.

Las biomoléculas

Los bioelementos se combinan entre sí para formar las moléculas que componen la materia viva. Estas moléculas orgánicas basadas

en el carbono las podemos agrupar en familias, que como podemos imaginar se van a diferenciar por sus estructuras moleculares. Aquí vamos a obviar estas estructuras para centrarnos en sus funcionalidades dentro del marco de necesidades de un organismo vivo, que precisa alimentarse, construir un entramado físico en donde mantener una actividad vital, comunicarse con el medio y, finalmente, reproducirse y transmitir su herencia.

En la función de nutrición tienen un especial peso los **lípidos** (grasas) y los **glúcidos** (azúcares). Estos últimos también participan activamente en la estructura informativa de los ácidos nucleicos ADN o ARN, e incluso colaborando con proteínas en tejidos de sostén.

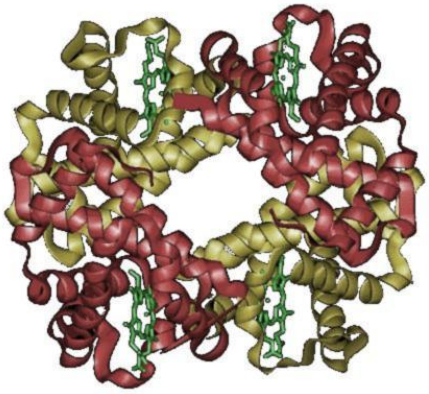


ácido esteárico

Los lípidos también son los elementos esenciales en determinadas estructuras celulares, gracias a sus largas cadenas moleculares, como la del ácido esteárico en la figura anterior.

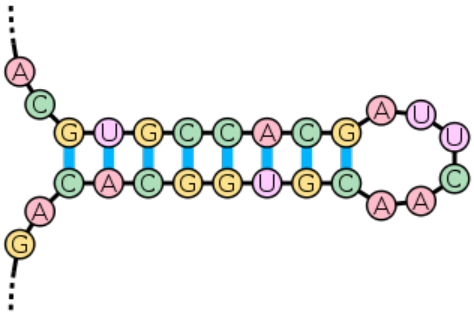
Las **proteínas**, uno de los **prótidos**, son las "funcionarias" que soportan el sistema: con sus moléculas construyen los entramados estructurales de los organismos, con su trabajo enzimático agilizan las reacciones metabólicas que son la base de la vida e incluso participan como actrices directas en las mismas, son los vehículos de transporte de diversas sustancias a nivel celular, nos defienden de amenazas exteriores del organismo… y un largo etcétera. Son largas moléculas, con un **intrincado y esencial enmadejamiento estructural**, formadas por una cadena de **aminoácidos**, otro de los prótidos esenciales. La forma de la madeja depende de la secuencia de aminoácidos, su forma geométrica y los posibles enlaces "intramoleculares" (como puentes de hidrógeno [4]) independientes de los propios que forman el polímero, siendo esta especial estructura enmarañada la característica **esencial** que condiciona su

función. Así como sea su forma, condiciona los espacios de acoplamiento con otras moléculas y las posibilidades de enlaces adicionales químicos mediante sus grupos fosfato o creando puentes de hidrógeno, entre otros.



La proteína hemoglobina, formada por cuatro proteínas globulares (Wikimedia, GFDL 1.2)

La responsabilidad de la función de herencia recae sobre los **ácidos nucleicos**, el ADN y el ARN. De ellos hablaremos con mucho más detalle en un próximo capítulo. Baste decir aquí que sus moléculas están formadas por largas cadenas de lo que llamamos **nucleótidos**, un entramado molecular de cooperación a tres entre un azúcar, una base nitrogenada -unas especiales moléculas orgánicas que forman anillos- y un grupo fosfato –el ión PO_4^{3-}-. Sus funciones también se extienden al campo enzimático, facilitando las catálisis, y metabólico, fabricando proteínas y autorreparándose. Las cadenas del ADN están formadas por una hélice de doble hebra mientras que las moléculas de ARN pueden formar estas hélices aunque son de hebra simple, a veces cerrada sobre sí misma.



La falsa doble cadena del ARN (Wikimedia, GFDL 1.2)

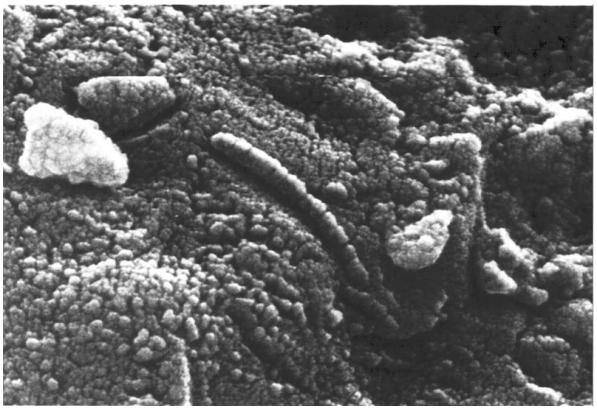
Una vez conocidos los participantes, profundizaremos en el **cómo**, cual debió ser la forma más plausible para que con estos mimbres pudiera representarse la función de la **Vida:**

¿Cómo apareció realmente la Vida en la Tierra? ¿Qué es lo que mejor sabemos de ello?

Son muchas las teorías, y explicaremos las más importantes por su trascendencia a lo largo del camino del conocimiento y por sus sólidas bases científicas. Hay que decir que todo son especulaciones, pero con una alta probabilidad de que funcionen, al menos con una probabilidad más alta que la que tienen otras explicaciones puestas sobre la mesa. Conocer con exactitud lo que pasó es una utopía, ya que exigiría revivir la historia geológica, y esto es un imposible. Los seres vivos más próximos en el tiempo han dejado un reguero importante de fósiles, sin embargo la Vida más antigua ha dejado solamente unas pistas químicas, enmarcadas en un entorno ambiental al que podemos analizar con un grado de especulación que resulta confortable para la ciencia. A partir de todo ello hay que conjeturar lo que pasó, ponerlo en el escenario del conocimiento, contrastarlo y someterlo a una crítica continua.

Vamos a dejar de lado las teorías de corte aristotélico que postulan una **generación espontánea** de la Vida por estar científicamente más que superadas.

Hay teóricos que opinan que la Vida vino del exterior, la **panespermia**, aminoácidos a caballo de meteoritos y cometas que cayeron sobre la Tierra y que fueron la semilla para una expansión futura. Científicos tan prestigiosos como el británico Sir Fred Hoyle postulaban esta posibilidad, ya que consideraba que el inicio de la Vida en la Tierra comportaba una mínima e increíble probabilidad. Hoy se sabe que el espacio interestelar está repleto de biomoléculas. En 1969 cayó un meteorito en Murchison, Australia, en el que, al ser analizado, se pudo detectar restos orgánicos y de aminoácidos. Estos resultados se repitieron en los análisis realizados con otros meteoritos.



Estructura del ALH84001 (Wikimedia, dominio público NASA)

Hay un segundo hecho relacionado también con meteoritos, esta vez de origen marciano, el ALH84001 que fue encontrado en la Antártida en 1984. Los gases que encerraba corroboraron su origen en el planeta rojo. Con una antigüedad de 4.500 millones de años, debió de saltar durante una de las terribles y múltiples colisiones de objetos que se daban en aquella época en el sistema solar interior. Presenta unas vetas de calcita que se forman por infiltraciones de agua, una pista de la Vida, al menos del tipo que conocemos en la Tierra. Se hallaron también granos minerales de magnetita de posible origen bacteriano, moléculas orgánicas y unos cuerpos que bien pudieran ser bacilos, como se ve en la fotografía anterior (aunque hay también opiniones en contra).

Sin embargo, si éste hubiera sido el germen de la Vida en la Tierra siempre quedaría en el aire la pregunta de *cómo se inició en el espacio*, fuera de nuestro planeta.

Si el origen físico de la Vida se produjo realmente sobre la Tierra, debió surgir progresivamente a lo largo de un proceso con raíces en un mundo de química abiótica y que desembocó en un mundo de química biológica elemental: a este proceso se le conoce como la **síntesis abiogénica**, nombre que proviene del griego *α- "no"*, *βιος- "vida* y *γενεσις- "principio"*, el inicio de la Vida desde una "no-vida".

Son muchas las mentes teóricas que han discurrido sobre cómo pudieron ser los inicios de la Vida, cómo a partir de los átomos

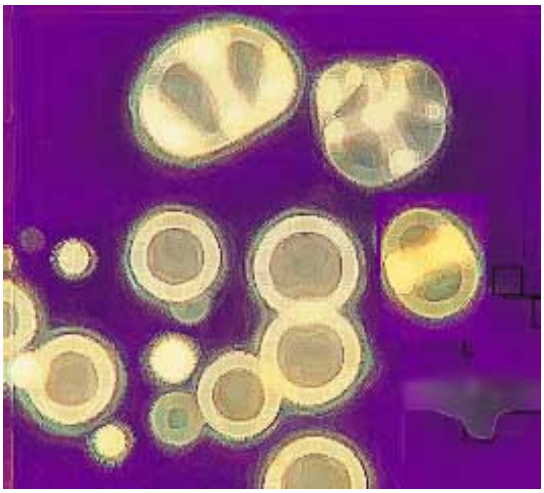
más elementales se llegó a las moléculas complejas que gestionan lo que hoy llamamos Vida. Comenzando por las ideas del bioquímico soviético Alexander I. Oparin y del biólogo evolutivo británico J.B.S. Haldane, padres al alimón y desconexos de la abiogénesis, ninguna teoría por sí misma da una explicación completa, e incluso algunas de ellas son meramente especulaciones sin un soporte experimental, por otro lado difícil de conseguir dada la baja probabilidad de reproducir en un laboratorio aquellos desconocidos inicios. En el mundo de la ciencia hay dos corrientes principales de opinión, las que apuestan porque la complejidad se inició como un mundo de información y replicación, en donde el material genético fue perfeccionando su función, y las que argumentan que el metabolismo, la máquina interna de los organismos, apareció antes que los sistemas codificadores de información. Entre las del primer grupo se encuentra la conocida **teoría del mundo de ARN**, postulada por el premio nobel Walter Gilbert en 1986, donde el ácido ribonucleico desarrollaría funciones tanto de archivo de la información como de catálisis química. Entre las del segundo grupo está la teoría del **mundo de hierro y azufre** que postuló en 1989 Günter Wächtershäuser.

Alexander I. Oparin fue el primero que teorizó en 1924 una evolución espontánea molecular que daba lugar a ciertos agregados complejos, que bautizó como **coacervados.** Él había observado que los principales ladrillos de la vida orgánica, como podían ser los azúcares, los aminoácidos o las proteínas, se podían sintetizar a través de procesos de laboratorio que no diferirían en gran medida de las condiciones y lo que pudo haber pasado en la Tierra más antigua. Estaba convencido de que en las aguas de los océanos primitivos debieron formarse sustancias orgánicas muy complejas y diversas, semejantes a las que constituyen los actuales organismos, aunque también era consciente de que una cosa es un ser vivo y otra una disolución de moléculas, de tamaño más o menos grande, en agua. Y se puso a estudiar el mundo de las disoluciones coloidales de moléculas relativamente grandes, en las que observó una cierta anarquía e inestabilidad, entre las que de

vez en cuando, a través de un proceso muy sencillo y espontáneo, se estabilizaban grumos de ciertas moléculas, decantándose como un sedimento o formando unos coágulos en equilibrio dentro del coloide. Todo dependía del tipo y estructura de las moléculas. A esos grumos, como ya hemos comentado, les llamó coacervados, del latín *acervus*, montón.

Los coacervados tenían una propiedad muy especial: habían condensado todas las moléculas de la solución coloidal primitiva de forma que ahora sólo se observaban unos grumos casi sin agua, rodeados de agua prácticamente pura, con la que no se mezclaban nunca. Ésta es la misma propiedad que tiene el protoplasma de las células vivas.

Dentro de los coacervados Oparin observó otra interesante particularidad: a pesar de su consistencia líquida, tenían cierta estructura interna. Las moléculas coloidales que los formaban no se encontraban dispersas al azar, sino que estaban dispuestas con una cierta estructura espacial y con una capacidad, en la mayoría de los casos, de absorber distintas substancias que se encontraban en la solución que les rodea. Esto solía provocar transformaciones químicas en su interior. La consecuencia de todo ello es que los coacervados podían aumentar de volumen y crecer a expensas de las sustancias externas absorbidas en su núcleo, aunque no todos lo hacían por igual.



Coacervados de Oparin (Wikimedia, dominio público)

A partir de todo lo anterior le fue fácil colegir que la mezcla de distintos cuerpos proteinoides primitivos -que se habían formado espontáneamente como los aminoácidos interestelares- en las aguas de la Tierra primigenia debió de dar origen a la formación de coacervados, que evidentemente no se podían calificar aún como seres vivos, pero que llevaban la semilla de la vida en su interior. Y al igual que en el laboratorio, cada coacervado desarrollaría una química distinta, dependiendo de cómo se hubiera organizado su estructura interna y de qué tipo de moléculas se iba encontrando en el medio exterior. Algunas opciones resultaron útiles, se conservaron y crecieron, mientras que otras fueron desapareciendo, aisladas por la presión medioambiental. Un inicio de la estrategia de la selección natural.

Las que crecieron lo hacían hasta un tamaño permitido por las leyes físicas y termodinámicas, más allá del cual el coacervado se debía romper en dos o más hijos, que poseerían una química idéntica a la del antecesor, es decir, habían heredado una química ganadora. Y tendrían aún más ventajas los que crecieran más deprisa, aquellos que tuvieran una mayor capacidad de absorción de moléculas externas, con lo que su química interna se iría complicando y haciendo todavía más rápida. Se comprende perfectamente que estos coacervados, dinámicos en su química y reproducción y estables en sus repetitivos procesos de replicación de sus componentes, podían haber tenido grandes ventajas sobre los demás coacervados que flotaban en la misma solución primigenia.

Y así, siguiendo un camino de incremento de la complejidad dentro de la estabilidad, se llegaría a un ser metabolizante y replicante, al ser vivo más primitivo. La teoría de Oparin, sin ser verdaderamente exacta, ha iluminado un camino probable, una senda de progresiva especialización molecular que pudo hacer posible el inicio de la Vida.

En los siguientes párrafos enhebraremos a lo largo de una misma historia cronológica lo que pudo ser el desarrollo de las

biomoléculas a partir de la “nada”, historia compuesta por retazos del ya comentado extenso universo de teorías sobre la abiogénesis. En la lectura de esta exposición no se nos debe olvidar en ningún momento que se trata de un relato posible –bastante probable a la luz del conocimiento actual-, aunque especulativo, y no se nos debe olvidar tampoco que el proceso es el sumatorio a lo largo del tiempo de una sucesión de cambios infinitesimales, modelados en cada momento por su particular medio ambiente.

Los inicios son claros de puro simples: Vemos un mundo de gases y polvo. Los elementos químicos revolotean en la espiral de acreción de la Tierra. Poco a poco se van juntando y van creando alianzas. En un primer momento todo fue muy sencillo.

Ya hemos comentado cómo las leyes de la química, de la termodinámica y del universo en general actuaban de forma “impersonal” y silenciosa, pero insistente. El electromagnetismo es la base de la unión, cargas positivas con cargas negativas: intercambios de electrones, enlaces iónicos y enlaces covalentes.

De las moléculas sencillas se tuvo que pasar a la complejidad. La Vida necesita moléculas sencillas, como el agua, o el amoniaco, o el metano. O el dióxido de carbono, o el cianhídrico… moléculas que ya sabemos que estuvieron desde el principio presentes como resultado de procesos geoquímicos naturales.

Pero también necesita de la complejidad, así que el nacimiento de las moléculas orgánicas fue otra cosa. Como ya hemos comentado, hay múltiples teorías que postulan un posible camino, pero en general la hoja de ruta comúnmente suele pasar por los siguientes pasos:

1. Creación de ciertas moléculas pequeñas básicas para la vida, como los azúcares, nucleótidos o aminoácidos, ladrillos elementales de moléculas más complejas como los ácidos nucleicos –ARN, ADN- y las proteínas.

2. Generación de fosfolípidos, moléculas de ácidos grasos con átomos de fósforo, imprescindibles para la formación de membranas cerradas, elemento clave para el metabolismo celular.

3. Fusión de nucleótidos formando cadenas de ácidos nucleicos, inicialmente de tipo ARN.

4. La "conquista" de la función enzimática por algunos ácidos nucleicos al aparecer las ribozimas –enzimas basadas en la ribosa, componente del ARN-, que catalizarían la síntesis de pequeñas proteínas.

5. Diversificación funcional: los ácidos nucleicos quedarán como portadores de información genética, mientras que las proteínas catalizarán las reacciones metabólicas.

En el siguiente capítulo veremos cómo pudo arrancar la Bioquímica, la química orgánica.

NOTAS DEL CAPÍTULO 02:

1. Los **bioelementos** o **elementos biogénicos** son los elementos químicos qu están presentes en los seres vivos. La materia viva está constituida por unos 70 elementos, la práctica totalidad de los elementos estables que hay en la Tierra, excepto los gases nobles. No obstante, los más frecuentes en los organismos vivos, de forma que entre todos ellos aportan más o menos un 96% de sus masas, son los siguientes: el carbono C, el hidrógeno H, el oxígeno O, el nitrógeno N, el fósforo P y el azufre S. Luego, en menor proporción (3,9%), participan el calcio Ca, sodio Na, potasio K, cloro Cl, yodo I, magnesio Mg y hierro Fe.
2. Quien tenga curiosidad no puede dejar de leer la magnífica serie sobre "*Cuántica sin fórmulas*" de Pedro en el blog hermano El Tamiz.

3. Es muy interesante el artículo publicado en el blog Experiencia Docet acerca de este tema, "*El origen matemático de los números cuánticos y de los orbitales atómicos"*, 2012.
4. La molécula del agua es dipolar, es decir actúa como un pequeño imán ya que los protones del núcleo del oxígeno desplazan ligeramente a toda la carga negativa de los electrones de la molécula del agua. El extremo del oxígeno actúa como polo negativo y el de los hidrógenos como polo positivo. Polo positivo que es capaz de promover enlaces electromagnéticos con los polos negativos de otras moléculas -incluso otras de del agua-.

03. La Química se apunta a lo bio

En el capítulo anterior explicábamos dos ideas que me parece importante recordar. En un primer bloque hablamos de algunas generalidades químicas, insinuando que el paso de la química prebiótica a la bioquímica y sus moléculas tuvo que ser algo inevitable en el mundo primigenio. Presentamos después las principales moléculas bioquímicas que tejerán y destejerán la Vida. Acabamos con un bloque acerca de las principales teorías acerca de cómo apareció la Vida sobre nuestro planeta.

Llegó la hora de avanzar a través de un tema bastante arduo: Teorías sobre lo que pudo ser el camino más posible desde la química prebiótica hacia el mundo de la especialización biótica. En éste capítulo hablaremos desde los inicios incipientes hasta el momento en que la trama estaba preparada para dar el salto a la complejidad. Nos moveremos por un terreno resbaladizo en donde algunas teorías son absolutamente deterministas con el suceso -la Vida fue un subproducto de lo obligado- y otras absolutamente azarosas, evolutivas y competitivas –la Vida como el resultado de un largo camino de circunstancias-.

Es claro que lo químico inorgánico y lo bioquímico son estados muy diferentes. Pero quiero enfatizar el porqué con relación a la Vida. Un sistema puramente químico está avocado a la estabilidad que le imponen las leyes termodinámicas. No evolucionará nunca. Un sistema bioquímico vivo se mantiene de forma dinámica continuamente al borde del desequilibrio, lo que le permite ganar orden y evolucionar gracias a la incorporación de energía exterior al sistema. Materia “muerta” versus materia “viva”.

Dicho lo anterior tengo que introducir una cuña para manifestar claramente mi admiración y asombro por la inteligencia y empeño que han manifestado todos y cada uno de los científicos que se atrevieron con tan arduo tema. Algunos de ellos saldrán a relucir a lo largo de las siguientes líneas.

Seguimos entre los ocultos recovecos del Hadeico: desde hace 4.570 hasta 3.800 millones de años.

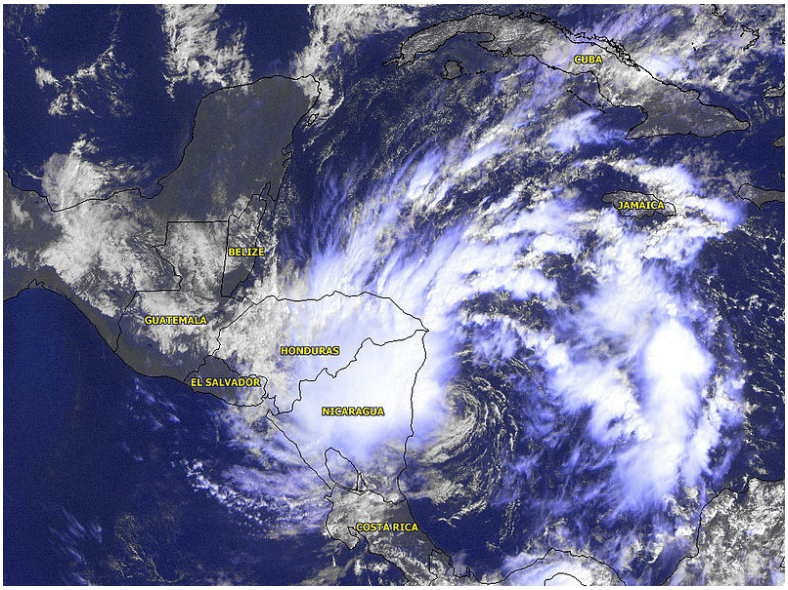
Un posible primer arranque de motores

Los avances de la física estadística, de la secuenciación genética y la comprensión más rica de la química interestelar, geoquímica y bioquímica, han hecho que los científicos puedan imaginar cómo los sistemas naturales podrían haber alumbrado la existencia de la Vida. Una de las teorías clásicas la ha enunciado el biofísico Harold J. Morowitz en su libro *Energy Flow in Biology* (1979). La idea surgió al contemplar cómo actúa la geosfera en determinados procesos. Por ejemplo, la radiación solar es absorbida sobre la superficie del planeta produciendo diferencias de temperatura en diferentes lugares. Físicamente, los principios generales de la geofísica serían capaces de aliviar estas diferencias mediante sencillos procesos de difusión. Sin embargo este camino sería tremendamente lento debido a la gran resistencia a seguir una sucesiva cadena de estados próximos al equilibrio. En su lugar la geosfera lo realiza mediante el transporte intenso y eficaz de energía **a través de un flujo** que se concreta en un frente de tormentas convectivas, como pueden ser los huracanes.

En la Tierra primitiva la generación de energía era descomunal, y como consecuencia de ello se iba "embalsando" un volumen de energía muy grande. Provenía de todos los fenómenos geofísicos y cósmicos que ocurrían en aquel momento del Hadeico y que ya conocemos. Por un lado la geoquímica estaba manteniendo un escenario de reacciones redox en donde el intercambio de electrones energéticos era la moneda habitual, mientras que por otro lado el sol enviaba su radiación de fotones generados en su particular horno de fusión. Este panorama acumulativo llegó a una situación inestable que pudo ser el detonador que inició la cadena de acontecimientos que trajo la Vida.

Esta situación de tensiones de la Tierra primitiva le sirvió a Morowitz de base para trasladar a la biosfera la teoría de creación

de **flujos energéticos** que comentábamos al hablar de los huracanes. En particular, en cómo se aprovecha la energía de los enlaces químicos. En un mundo primigenio debían sucederse infinitud de reacciones redox,[1] una de ellas la del hidrógeno molecular (un reductor) con el dióxido de carbono (un oxidante). La verdad es que no es fácil que esta reacción se produzca de forma espontánea en la naturaleza aunque sea exoenergética -libera energía-. Por el contrario, los organismos vivos consumen abundantemente estas moléculas para sintetizar otras diferentes, a través de sus procesos metabólicos, con unos rendimientos energéticos próximos al 100%.



Huracán Katrina, un ejemplo para Harold Morowitz de canal de flujo energético (Wikipedia, dominio público)

¿Cómo explica Morowitz esta habilidad? Propone que en un momento determinado, y como alivio de la situación de inestabilidad generada por el estrés de potenciales redox que abundaban en la naturaleza primigenia, se generó en la biosfera un espontáneo, rápido y nuevo canal de energía, que mejoró el aprovechamiento de los procesos redox, aprovechamiento que iba a permanecer en el tiempo: es como si se hubiera gestado un **cambio de fase** en el proceso de paso desde un estado inestable de tensión energética a un nuevo estado estable. Ésta es la idea fundamental.

Así se explicaría que el aprovechamiento del potencial redox por la Vida sea prácticamente del 100%. Esto pudo iniciarse, de acuerdo a Morowitz, con un "cambio de fase" en las condiciones geoquímicas, que se concretó en la nueva figura de un ciclo anabólico casi universal, mediante el cual los seres vivos, hasta hoy en día, montan sus estructuras. Se trata del ciclo del ácido cítrico o de Krebs, del que hablaremos en el momento oportuno, y que surgió en los primeros momentos de la Tierra primitiva.

También hemos dicho que existe otro estrés energético en la geosfera que lo produce la radiación solar. Antes del "invento" de la fotosíntesis esta energía, prácticamente en su totalidad, se transformaba en calor en los océanos gracias a múltiples y débiles procesos de dispersión elástica, que eran los motores del clima global. Este es el argumento que también hace pensar a Morowitz en la espontánea generación de otro nuevo flujo de energía, que provocó un inédito "cambio de fase", tras el que la energía solar fue aprovechada por biomoléculas, como la rodopsina o la clorofila, mediante proceso físicos de absorción inelástica. Y, además, con un rendimiento extremadamente elevado.

Las consecuencias de estos dos "cambios de fase" conforman dos de los constituyentes principales de la Vida: los ciclos metabólicos y la fotosíntesis. Visto lo visto, a Morowitz no le quedó otra que postular lo que resultaba casi una evidencia: la Vida surge espontáneamente y de forma rápida como consecuencia de la geoquímica y la geofísica, en un planeta estresado por la superabundancia de energía. Y en cualquier parte del universo en que se den estas circunstancias tiene que suceder lo mismo.

En base a estas ideas –que tienen un serio soporte físico-matemático en la mecánica estadística de procesos fuera del equilibrio, o de caos- Morowitz pensó que el sistema formado por la Tierra primigenia iba alcanzando progresivos estados de equilibrio *cuasi estable* que en un momento determinado se destensionaban mediante la generación de *flujos de energía*. Ello hacía que se fueran *traspasando umbrales,* a través de los cuales se

producía algo semejante a un *cambio de estado*. Después de este proceso se llegaba a otra situación del sistema con un *equilibrio energético más estable* que el de partida. Y vuelta a empezar.

Morowitz cree que el camino se inició con un panel de diversas vías metabólicas, que se unificaron gracias al invento de la fosforilación oxidativa que creó las pilas de bioenergía en forma de moléculas de ATP (nos serán presentadas más tarde en esta serie). Nuestro Último Antepasado Común Universal (LUCA) fue el que recopiló todos los avances, representando así el final del mundo exclusivamente abiótico. Con posterioridad se conquistó la fijación del nitrógeno, la innovación de la fotosíntesis complementada con en el ciclo reductor de Calvin, las endosimbiosis, la multicelularidad… un proceso continuo de cambios de estado que poco a poco iremos conociendo.

El soporte teórico a esta hipótesis de Morowitz lo encontramos en los trabajos del físico Jeremy England.[2] Apoyándose en la estadística, las matemáticas y las leyes universales de la termodinámica, en especial la del obligado aumento de la entropía global, ha demostrado que cualquier sistema local dentro del Universo, alejado de un equilibrio estable, con una particular fuente de energía a su disposición y un sumidero de calor, puede evolucionar hacia otro estado, alejado del equilibrio energético, mucho más ordenado (lo que parece contravenir la obligación de incrementarse la entropía) y más eficiente consumidor de energía (con la que soporta el aparente contrasentido del salto a un mayor orden). Este nuevo estado es irreversible y tendente a consumos cada vez mayores y más eficientes de energía, lo cual puede hacer la sucesión de “cambios de estado” obligatoriamente exponencial. La probabilidad de que esto ocurra es baja a menos de que, como hemos comentado, haya un determinado tipo de fuente de energía y de sumidero de calor que se acople con las específicas condiciones del sistema particular, lo cual acelera tremendamente, a escalas geológicas, los cambios de fase. Y esto es lo que sucede en la Tierra, en donde coinciden los materiales apropiados, con una

fuente de calor apropiada como es el Sol, y unos sumideros de calor igualmente apropiados en la atmósfera y el agua oceánica.

Y así de una forma inevitable, dirigida por las leyes universales de la termodinámica, la Vida se habría ido manifestando cada vez más compleja, mayor y más eficiente consumidora de energía, como un medio para aliviar la acumulación de energía libre de la geosfera: parece por tanto que un mundo con Vida tuvo que ser más probable que un mundo sin ella. **Lo que apunta claramente a un proceso determinista y no azaroso**. La evolución determinista de la química del metabolismo, a través de todos sus progresivos posteriores "cambios de fase", fue la que poco a poco fue condicionando la variabilidad de los organismos vivos, **cuya aparición y fenotipos sería un subproducto de estas conquistas metabólicas.**

Primeras moléculas orgánicas sencillas de la química prebiótica

En un principio la química prebiótica iniciaría el camino sin ningún problema, tan sólo había que trabajar con moléculas relativamente sencillas que quedaron disueltas en las aguas primigenias.

Es fácil sintetizar de una forma casi espontánea azúcares, aminoácidos y algo parecido a elementales nucleótidos: los químicos norteamericanos Stanley Miller y Harold Urey lo consiguieron en 1953 con sus experimentos. Sólo necesitaron metano, amoniaco, agua, un poco de energía y algo de tiempo, no demasiado. Entre las décadas de los 50 y los 60 otro bioquímico estadounidense, Sidney W. Fox, demostró que los aminoácidos podían formar espontáneamente pequeños péptidos. En 1961 el también bioquímico, en este caso español, Juan Oró, obtuvo algunas purinas –un tipo de base nitrogenada del ADN o ARN- y en 1962, en otro experimento, consiguió la síntesis de dos azúcares, ribosa y desoxirribosa, asimismo componentes de soporte de los ácidos nucleicos en el ADN y ARN. En 2012 y tras unos trabajos [3] de más de diez años, un grupo de biólogos dirigidos por Michael

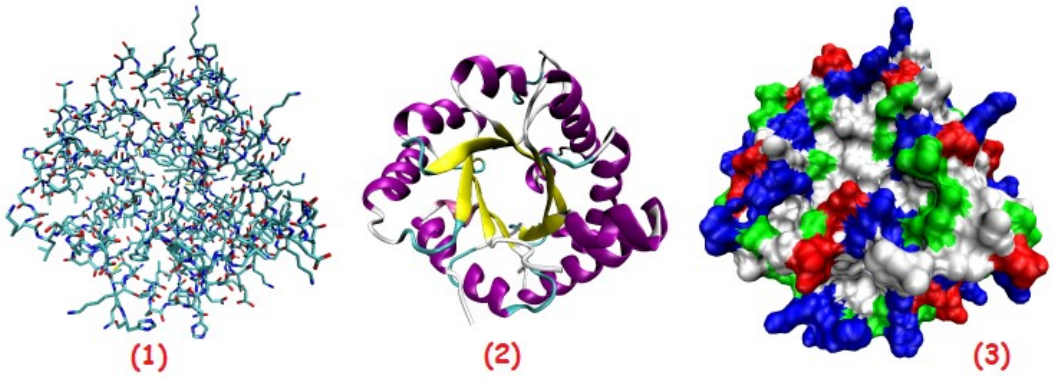
Blaiber ha encontrado, a partir de un conjunto de 12 o 13 aminoácidos prebióticos producidos por sencillos procesos químicos semejantes a los existentes en la Tierra primitiva, el camino para sintetizar primitivas proteínas plegadas (del tipo β-trefoil). El plegamiento es esencial para el desarrollo de sus funciones. Los propios aminoácidos dispondrían por ellos mismos de la información necesaria para ello.

Un artículo publicado en 2015 [4] explica cómo ha sido posible sintetizar experimentalmente, y de forma altamente eficiente, los monómeros fundamentales de la bioquímica -ribonucleótidos, aminoácidos y precursores de lípidos- a partir de dos sencillas moléculas: el ácido cianídrico, HCN, y el sulfuro de hidrógeno, SH_2. En la Tierra primigenia el primero habría sido generado por la interacción entre el carbono aportado por meteoritos y el nitrógeno atmosférico, gracias a las altas temperaturas alcanzadas en el impacto. El SH_2 habría surgido en la reacción de ciertos sulfuros metálicos con el HCN en disolución. Además es un gas típico de las emisiones volcánicas.

Una vez formados en la naturaleza este tipo de compuestos orgánicos elementales, que serían inicialmente tan sólo unos treinta o cuarenta, se vieron en condiciones de seguir un camino de combinación entre ellos de forma que aparecieran polímeros con estructuras moleculares más complejas. Inicialmente serían polisacáridos, polipéptidos y polinucleótidos. Más tarde aparecerían los lípidos complejos. El proceso pudo ser tutelado según los principios generales definidos por Morowitz, o quizás simplemente como consecuencia del juego de la competencia y evolución, tesis que planteamos en los siguientes pasos, que los llevó a encontrar unas formas termodinámicamente más estables, algunas de las cuales resultaron ser geométricamente muy laberínticas.

Estas formas tan particulares que adoptaban las cadenas de los polímeros que iban apareciendo eran como su tarjeta de visita: con una cara exterior real llena de recovecos físicos y una capacidad de

generar posibles enlaces adicionales extramoleculares en los rincones de su estructura, lo cual facilitaba en alguna medida la complementariedad entre dos o más de estos polímeros.



Estructuras, (1) primaria, (2) secundaria y (3) terciaria ya plegada, de una proteína (Wikipedia, GFDL 1.2)

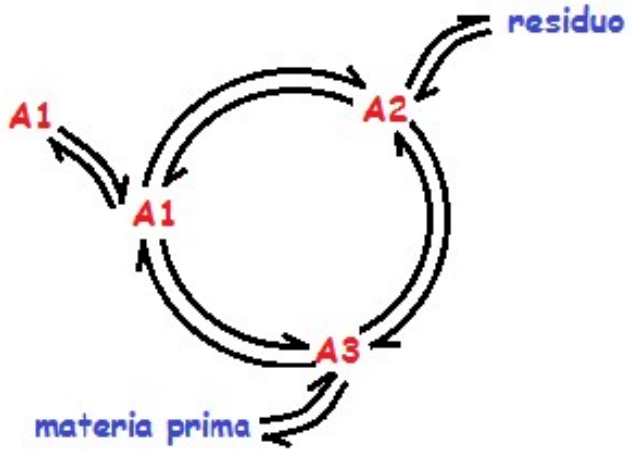
Se habría llegado a una tremenda versatibilidad, a partir de la cual estas moléculas ya más "serias" interactuaban con el medio que les rodeaba, siendo capaces de ejercer un involuntario influjo sobre él, modificándolo o resistiéndose a ser modificadas, lo que podría ser considerado como algo semejante a una primitiva función catalítica. Sus inicios debieron ser muy débiles e inespecíficos, para irse potenciando con el paso del tiempo. Aquellas estructuras más estables y eficientes, con mayor capacidad de influir, serían las que sobrevivirían en el mundo prebiótico.

Supongamos pues un caldo lleno ya de estas moléculas de polipéptidos y polinucleótidos, una charca sobre una roca del acantilado o un lúgubre espacio en las profundidades más remotas de los océanos. Quizás habían llegado transportados por los meteoritos y cometas que caían sobre la Tierra. En aquel momento aún todo era química y sólo química prebiótica. A partir de este escenario tuvo que derivar la complejidad.

Primeros autorreplicantes: moléculas "selfmade" sobre bandejas planas

La complejidad, con el tiempo, acabará llamándose *metabolismo y replicación*. Es decir, capacidad de tener una máquina en movimiento, generando no sólo las moléculas necesarias para

seguir funcionando sino también la diversidad. Al estar sometidas a mutaciones, al autorreplicarse solas o con ayuda, al transmitir sus cambios en el proceso, iniciaron un camino para la herencia, paso previo e imprescindible al de modelado por la selección.



*Ejemplo de posible ciclo autocatalítico del primer replicante **A1** apoyado en una cadena de moléculas "familiares"*

En esta senda la mayoría de expertos apuestan por un mundo inicial de química prebiótica en donde apareció un **primer replicante**. Una molécula que no iba mucho más allá que hasta una incipiente y simple reproducción de sí misma. Se encontró inmersa en un mundo que le imponía múltiples interrelaciones, algunas de las cuales condujeron a un proceso cíclico de síntesis que se asemejaba a una máquina sin fin, y en el que dicha molécula participaba de forma principal. El mecanismo pudo ser algo parecido a un *ciclo catalizado por el propio primer replicante*, ciclo al que entraban moléculas del entorno y del que surgían otras como subproductos del mismo, entre las que se encontrarían moléculas iguales al replicante. Aunque sencillas, no dejaban de ser auténticas fábricas cíclicas de síntesis de un polímero elemental. El hecho de que la autocatálisis sea un proceso natural muy común en los sistemas cíclicos bioquímicos de la naturaleza nos permite pensar que este primer replicante no fue una entelequia teórica. La autorreplicación primigenia no sería muy sofisticada, no habría más complejidad en el proceso que repetir su recreación, sin un más allá, de una forma que podríamos llamar "rutinaria" y sin consecuencias inmediatas.

Este proceso no se correspondía aún a una replicación "vital", ya que se produciría de una forma aleatoria y no persistente en el tiempo.

¿Por qué pensamos en autorreplicadores? Ya vimos en el capítulo anterior cómo las reacciones entre átomos y moléculas construyendo nuevas estructuras químicas era un proceso relativamente sencillo. Bastaba cumplir unas sencillas condiciones que estuvieran de acuerdo con la segunda ley de la Termodinámica. Pero dentro de este esquema la dinámica de las reacciones, como podemos imaginar, puede ser muy variada. Y en la química primigenia, cuando se tuvieron que producir las reacciones químicas formadoras de nuevas moléculas más complejas, las cosas tuvieron que ir muy deprisa dado el plazo tan corto entre la formación de la Tierra y el primer indicio de Vida sobre ella. Y aquí entra la idea de la catálisis, proceso por el que, mediante la intermediación de una molécula ajena al núcleo de la reacción química, su velocidad se acelera de forma exponencial. Y pensemos en el plus de velocidad que se añadiría si el catalizador fuera la misma molécula que interviene.

Se cree que en una disolución tridimensional, como podía ser el entorno de una charca o del fondo del mar, la generación espontánea de autorreplicadores debía ser bastante compleja dada la dispersión en que se encontrarían los actores que tenían que participar. Por otro lado, la unión de moléculas más elementales para formar polímeros se realiza normalmente mediando un proceso de condensación, durante el que se elimina una molécula de agua, y esto sería muy difícil en el seno de una disolución precisamente en agua. Así que ¿por qué no imaginar un mecanismo medianamente probable, mediante el cual se pudiera echar el lazo a los ladrillos necesarios para las estructuras moleculares de los autorreplicadores en un entorno en donde la autocatálisis fuera a la postre menos dificultosa? El proceso pudo darse sobre una superficie que limitara la dispersión a tan sólo dos dimensiones, sobre la que las moléculas que la recubrieran establecerían relaciones entre sí, aprovechando el "velcro" que supone la fuerza

de sus enlaces químicos. Estos no serían demasiado potentes, ya que debían permitir la flexibilidad y fluidez suficiente como para que se produjera un fácil tejer y destejer de moléculas. Dado que los velcros de las moléculas de tipo orgánico suelen presentar anclajes electromagnéticos negativos, una especie de anzuelos aniónicos del tipo $-PO_3^{2-}$ o $-COO^-$, las superficies donde reposaban tendrían que ofrecer la cara contraria. Una posibilidad entre los materiales catiónicos lo encontramos en la pirita, que además forma sales insolubles que fácilmente se decantan produciendo sólidos. Volveremos con la pirita, S_2Fe, más tarde en esta historia, ya que es una de las bases de la teoría del "mundo del hierro y el azufre". Recordemos que esta teoría la apuntó ya el bioquímico alemán Günter Wächtershäuser defensor, al igual que Morowitz, del axioma "primero el metabolismo", por el que proponía que una forma primitiva de *metabolismo* precedió en el entorno de la biología a su contrapartida *genética*, y en el que intervendrían especies químicas y compuestos de hierro y azufre. La energía liberada a partir de las reacciones redox de los sulfuros metálicos no sólo estaba disponible para la síntesis de moléculas orgánicas sencillas, sino también para la formación de polímeros de largas cadenas.

Nos quedamos en este momento procesal, después de levantar acta notarial de cómo pudo iniciarse la Vida y las primeras simples moléculas autorreplicantes. En un mundo escondido y casi abstracto que, al menos a mí, me resulta muy difícil de imaginar. Espero que el interés del tema haya hecho más llevadera la lectura, a pesar de su evidente aridez. A lo largo del esfuerzo hemos convivido con un eslabón muy importante de nuestra historia.

En el próximo capítulo seguiremos su pista y veremos cómo se fueron complicando sus funcionalidades con la conquista de la información y la replicación a gran escala, lo que nos llevará hasta el mundo del ARN, fin de una etapa e inicio de algo nuevo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 03:

1. Se denomina reacción de reducción-oxidación, de óxido-reducción o simplemente reacción redox, a toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos.
2. Podréis encontrar una explicación que aclara el tema en la entrada, "*La matemática de la conducta*", del blog "*Qué vida esta*" publicado por Samu.
3. "*Simplified protein design biased for prebiotic amino acids yields a foldable, halophilic protein*", Liam M. Longo et al., que se ha publicado en la revista científica PNAS de noviembre de 2012.
4. "*Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism*", Bhabesh H. Patel et al., en la publicación Nature Chemistry.

04. Se inicia la complejidad

Seguimos en el eón Hadeico. Decíamos al final del capítulo anterior que las sencillas moléculas autorreplicantes y autocatalizadoras dieron un paso más. La complejidad de la Vida, basada en el metabolismo y la replicación y heredabilidad, necesitaba alguien que encendiera la mecha. Y fueron esas moléculas las que lo hicieron. En este capítulo haremos un compendio de algunas ideas destacadas dentro del mundo científico que intentan comprender y explicar cómo pasó todo.

Crece la complejidad mediante la colaboración

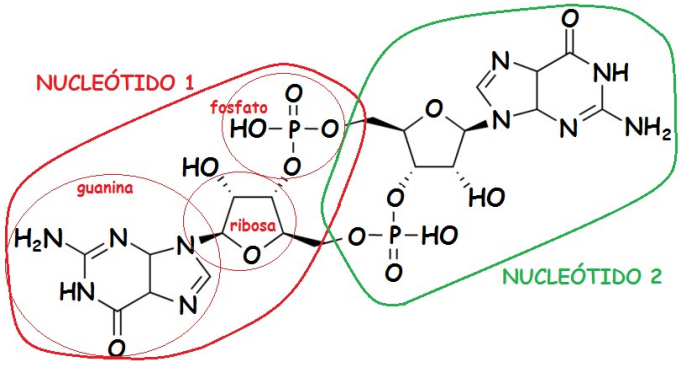
La idea de que algo se gestó sobre una superficie es muy atractiva, ya que parece fácil que sobre ellas se pudiera iniciar la formación de ciclos autocatalizadores en donde aparecieran moléculas replicantes. Desde el punto de vista termodinámico es más sencillo. Lo que se argumenta es que *la formación de un polímero desde una superficie supone forzar menos el "antifísico" deterioro de la entropía*: el punto de partida es menos conflictivo, el desorden sobre una superficie es menor que el caos en una disolución tridimensional, y por tanto el salto atrás entrópico hasta el orden molecular va a ser menos costoso energéticamente, y por consiguiente más probable. Por otro lado, las moléculas fijadas por una superficie, al tener menos movimiento, disfrutarán de más oportunidades para asociarse con sus vecinas. Es más, una vez cebados los ciclos autocatalíticos, las moléculas contiguas, que con el tiempo aparecerán cada vez más como mutaciones del mismo ciclo, debían ser muy parecidas, presentando casi la misma estructura molecular.

En estas superficies se generarían por tanto unas "relaciones familiares" a nivel molecular, con preferencias de interacción -evidentemente no un acto volitivo, sino por el hecho de tener estructuras semejantes- que desembocarían en unos colectivos que

tendrían que competir según la eficiencia de sus redes "sociales": *los ciclos familiares más ágiles monopolizarían poco a poco los recursos*, los mismos que necesitaban otros ciclos familiares menos dinámicos, que irían desapareciendo con la inanición. Sobre las superficies quedarían los más exitosos, aquellos que hacían girar con más eficacia su ciclo, es decir, los que reproducían con menos errores las moléculas madres y las fabricaban con más generosidad y a mayor velocidad, lo que les permitía no sólo expandirse, sino también compensar los intentos fallidos que sin lugar a duda ocurrían: *el ciclo autocatalítico más prolífico en la generación de sus componentes tendría más argumentos a la hora de tapar agujeros*, de compensar malos funcionamientos del mismo. No obstante, a la larga, mutar no llegó a ser tan malo, ya que la base de su futura evolución se encontraba precisamente en estas mutaciones.

Así que tenemos a nuestros replicadores moviendo su propia maquinaria de síntesis y polimerización, funcionando de una forma automática pero aún muy limitada en el mundo de la química prebiótica, cuando la complejidad estaba aún en sus inicios. *No había todavía moléculas enzimáticas especializadas* que agilizasen las reacciones y polimerizaciones. Para ser moléculas potentes, cercanas a las que conocemos hoy como partícipes de la Vida, tendrían que seguir desarrollando su estructura y hacerse más y más complejas. Aunque no les debió faltar quien les ayudara.

Conocemos sencillas moléculas, como la **cíclico-di-GMP**, que actúan en las eubacterias actuales, los tipos más ancestrales de procariotas, interviniendo sobre sus moléculas de ARN de forma que estas últimas activan su función. Una muy elemental actuación de tipo catalizador. Y todo lo hacen sin la mediación enzimática de proteínas. Su estructura es muy simple y consiste en un elemental ciclo de ARN formado por sólo dos nucleótidos tipo guanina. A la vista de este tipo de habilidades bien pudiera ser que alguna especie de protoARN de este estilo mediara en los cambios moleculares del mundo de la bioquímica elemental, en donde la presencia de enzimas debía ser apenas testimonial.



Molécula de cíclico-di-GMP (a partir de Wikipedia, dominio público)

Algunos de los ciclos catalíticos descritos más arriba, la maquinaria de los autorreplicadores, *con el tiempo "aprendieron" también a colaborar y convivir con otros ciclos* como si el conjunto fuera una entidad individual. Bien pudo pasar que el desecho de uno de ellos fuera justo la materia prima que otro necesitaba, y al revés. Los dos ciclos convivían "simbióticamente" manteniendo su simplicidad; y si lo hacían sobre una superficie aún mejor, el proceso resultaría más sencillo. Esta colaboración simbiótica entre moléculas permite imaginar que quizás leyes o usos que encontramos en la biología también funcionan en las moléculas simples dentro del mundo de la química.

Sobre esta base se han hecho experimentos que demuestran que es relativamente fácil sintetizar de una forma muy simple un buen número de compuestos, aunque el éxito de laboratorio se resiste en algunos muy importantes para la Vida, como es el intento de unión de una ribosa con una base pirimidina, componentes primarios de la cadena de los ácidos nucleicos.

Los problemas de la replicación abren la puerta de la heredabilidad

Hemos dicho repetidamente que la vida no sólo es replicarse y mutar. También hay que evolucionar, y para ello hay que conseguir poder transmitir la propia información, la propia estructura química y el fenotipo molecular. A esto se le llama **heredabilidad**, que no

es una cosa simple, ya que para que tenga impacto en el propio entorno debe ser continua y variada en el tiempo, no un mero incidente aislado. La heredabilidad pudo comenzar con una mutación durante la replicación. Nuestros ciclos autocatalíticos, que progresivamente habían perfeccionado tanto su eficacia como sus redes de colaboración, son ya capaces de replicarse. Y además sus propios partícipes experimentarían mutaciones en las estructuras moleculares, mutaciones que transmitirán más tarde en los siguientes ciclos de replicación. Incluso podrán generar variabilidad *en los mismos ciclos de replicación como un conjunto* al transmitirse los fallos que se produzcan en el proceso, lo que en algún caso será el inicio de procedimientos más eficientes.

Durante el ciclo de replicación el polímero afectado estaba transmitiendo toda la información que lleva encriptada en su estructura molecular, de forma que cuanto más larga fuera ésta mayor podría ser la cantidad de información que transmitiera a su herencia, y a más información, mayor complejidad. Es fácil intuir que se encontró con un inconveniente, ya que había *una relación biunívoca entre una gran longitud de polímero y una gran probabilidad de error durante la replicación*. Esto en principio tampoco era muy malo ya que permitiría un gran abanico de alternativas, que puestas en la batalla de la competencia, iban a proporcionar con mayor probabilidad un eficiente replicador. Pero, a pesar de todo, ello iba en contra de la "carta constitucional" del polímero largo y complejo, que consistía en que pudiera transmitir un buen volumen de información en el paquete de herencia con los mínimos errores. Su dilema era, por tanto: longitud/error *versus* longitud/información.

Está demostrado que hay que superar una determinada **tasa umbral de fiabilidad** para poder construir largas cadenas moleculares, imprescindibles para alcanzar complejidad. Y los polímeros del mundo prebiótico no podían ser generosamente largos, ya que aún no se había "inventado" la función enzimática [1] que les ayudara a traspasar este umbral: los polímeros debían funcionar solos. La pescadilla se seguía mordiendo la cola ya que,

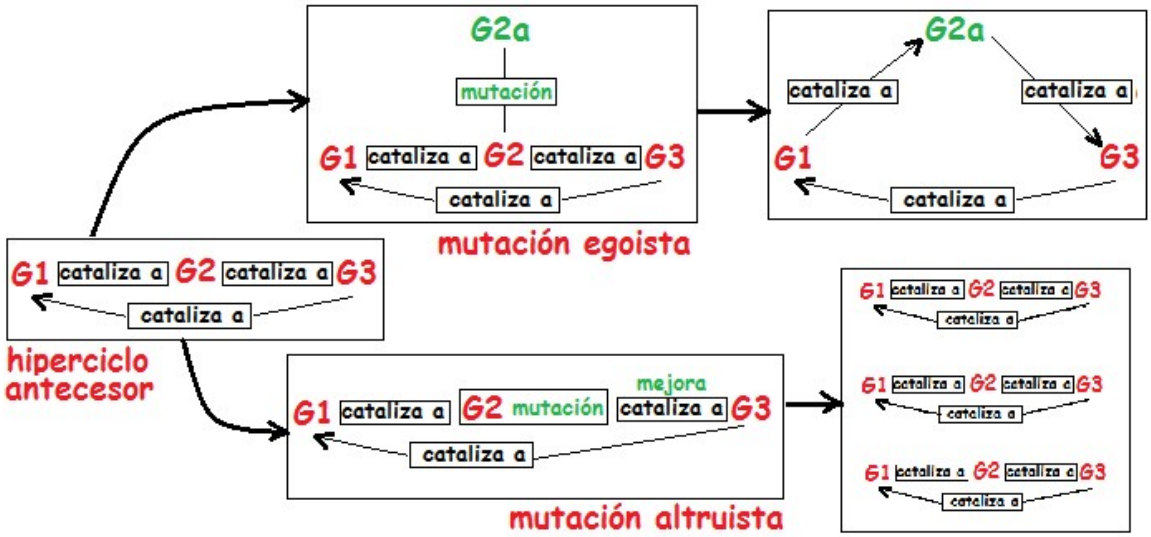
a su vez, para que aparecieran enzimas eficaces se necesitaban moléculas de largas cadenas que pudieran enmadejarse y presentar así una estructura geométrica y de enlaces químicos suficientemente compleja como para realizar la función de robot ensamblador de moléculas. Pero ya hemos dicho que en el poco fiable mundo prebiótico esto era un imposible: dada la alta tasa de errores en las replicaciones, los polímeros no podían ser demasiado largos. Si hablamos de algo semejante a un ARN, estaríamos hablando de quizás 10^3 a 10^4 nucleótidos. Se estima que el genoma humano tiene alrededor de 3×10^9 pares de nucleótidos.

Este entorno plantea un problema que parece irresoluble y que se conoce como la **paradoja de Eigen**: para incrementar la complejidad se precisaba transmitir mucha información, por lo que las moléculas que podían hacerlo debían ser largas. Pero en el mundo primigenio las cadenas eran muy cortas, con un índice de fiabilidad no muy elevado. Se precisaban moléculas "obreras" que agilizasen las polimerizaciones y así conseguir moléculas más largas y con alta fiabilidad en la replicación, es decir, se necesitaban enzimas. Pero las enzimas eficientes precisan de largas y enrevesadas cadenas moleculares imposibles de conseguir en aquellos momentos. ¿Cómo resolver el dilema?

El método general pudo estar en la replicación por "plantillas" ya que se ha comprobado que la mayor fiabilidad del proceso se da en aquellos casos en que la replicación se realiza en base a la copia de estructuras moleculares por este procedimiento, es decir, que tu propia estructura pueda servir de molde para la replicada, como sucede con los ácidos nucleicos actuales. Eso permite pensar que la replicación por "plantillas" pudo ser la solución, ya que sobre un mismo polímero bien pudieron coevolucionar a la par las dos adaptaciones, apoyándose la una en la otra: largas cadenas junto a poder catalizador, lo que permitió la gestión y heredabilidad de mucha y fiable información. Pero también hay otras ideas.

Apoyados en las ventajas de la colaboración

Quizás la base de la solución de la paradoja de Eigen se encuentre en alguna de las dos teorías siguientes. Se trata, por un lado, de la **cohabitación de genes** -utilizaremos ya la palabra *gen* para definir a las cadenas de información que se replican- sin que existiera competencia entre ellos, quizás moléculas de una similitud estructural, seguramente tipo protoARN, componentes de una misma familia evolutiva. Nos imaginamos a muchos polímeros cortos que se aliaban para dar una *apariencia funcional* de cadena larga.



Árbol de alternativas de mutaciones dentro de un hiperciclo

Otra posibilidad, hoy por hoy teórica, pasa por la existencia de **hiperciclos,** una cadena de "protogenes" (en el sentido de autorreplicantes portadores de información) en la que cada uno de ellos realizaría algo parecido a una función enzimática de catalización en la síntesis de otro, y este a su vez de otro, y este tercero a otro cuarto, hasta cerrar el círculo con un gen que ayudara a catalizar al primero. No habría una cadena única, larga, sustentadora de la información, sino que ésta estaría repartida entre poseedores parciales de la información, cada uno de ellos autorreplicantes, propiedad ésta que no la tendría el hiperciclo como una unidad. Cada uno de estos genes, durante sus replicaciones, iría acumulando mutaciones; algunas los harían más

atractivos a su correspondiente enzima (la que participa en su catálisis, es decir el gen anterior de la cadena) mientras que otras mutaciones mejorarían su habilidad catalizadora. En el primer caso podría surgir un nuevo hiperciclo en donde el mutante sustituiría al mutado perdiéndose el ciclo inicial (mutación egoísta) y en el segundo caso dando "alas" al hiperciclo, ya que uno de los pasos sería más eficaz, más prolífico, lo que supondría una ventaja para el conjunto en su capacidad generadora (mutación altruista).

Se ha podido comprobar que si esto *sucede en un entorno abierto* los nuevos ciclos que surgen tras una mutación egoísta se dispersan y sobreviven, mientras que los ciclos consecuencia de mutaciones altruistas no consiguen una masa crítica como para imponer sus ventajas. Situación a la que se le da la vuelta si el *hiperciclo está confinado dentro de una membrana:* en este caso, si la concentración de genes en el interior es baja, la tendencia es a que el efecto positivo de los altruistas logre contrarrestar el negativo de los egoístas, permitiendo al hiperciclo reproducirse con eficacia, incrementar su población y expandirse con éxito siguiendo la división de los compartimentos donde están confinados. Suena a que algo como una célula debe ser un lugar de éxito ¿verdad?

En la Universidad Estatal de Portland se ha conseguido recrear por primera vez este tipo de redes químicas de ácidos nucleicos cooperadores.[2] Se fabricaron tres tipos de moléculas de ARN defectuosas que podían repararse entre sí, de tal modo que A reparaba a B, B reparaba a C y C reparaba de nuevo a A. Al ponerlas juntas se observó que la red colectiva y de cooperación funcionaba bien y más eficazmente que con moléculas no colaboradoras. Hace tiempo ya se sabía para el caso de tan sólo dos moléculas participantes, pero el experimento de la universidad de Portland ha demostrado que con tres también funciona, lo que abre la puerta a redes con más moléculas de distinta clase: si se ha podido pasar de dos a tres, entonces también se debe poder ir de tres a cualquier otro número. Estas redes son aún más versátiles en el caso de que las moleculares participantes tengan estructuras geométricas que les permitan acoplarse espacialmente, lo que a la

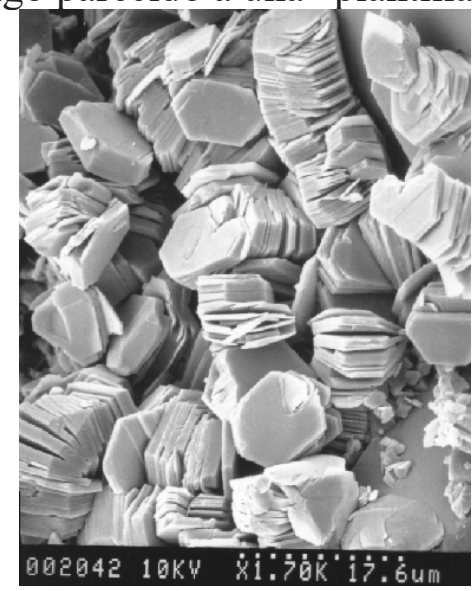
larga puede desembocar en la polimerización de una larga molécula.

¿Pueden los hiperciclos ser el origen del éxito de los replicadores de largas cadenas con un gran potencial de información? Al menos es una teoría plausible. No obstante, no es todo tan fácil, nos queda mucho por demostrar. De entrada, la generación "espontánea" del ARN es muy problemática. Se ha logrado sintetizarlo en el laboratorio a partir de una disolución de nucleótidos, con la presencia de una semilla iniciadora en forma de molécula del tipo ARN y una enzima *sintetasa*, también conocida como *ligasa*, (las que se encargan de agilizar la síntesis de moléculas). Un experimento demasiado a la medida como para poderlo imaginar en el mundo real, y menos aún en el mundo primigenio cuando aún no habían aparecido las enzimas. Sin embargo algo así debió suceder, quizás a través de un hiperciclo.

O bien todo pudo empezar aún antes, según la hipótesis que maneja el químico y biólogo escocés Graham Cairns-Smith, en la que postula que los primeros "genes", como elementos portadores de información y autorreplicadores, no fueron de ARN sino de **arcilla**, en un mundo donde se producía fácilmente su interrelación con pequeñas moléculas orgánicas.

La arcilla -la *nata* de la disgregación de las rocas- se forma rápidamente a partir de una disolución saturada de los iones adecuados (aluminio, magnesio y silicio) reproduciendo en su crecimiento, capa a capa, las irregularidades de su estructura. Los iones forman dibujos irregulares que pueden atrapar moléculas aniónicas. Sus cristales crecen a partir de una semilla del mismo material, pudiendo romperse cada uno de ellos de forma que cada trozo tiene la capacidad de constituirse en otra nueva semilla. A partir de la aparición de los lógicos errores de la configuración iónica durante el crecimiento del cristal es como se puede almacenar en su superficie información variada. Si estos errores se transmiten al romperse el cristal podríamos hablar de herencia. Este proceso se pudo iniciar fácilmente en el momento en que una

disolución saturada de silicatos empapara una piedra porosa de arenisca, en la que podrían crecer cristales variados de arcilla con diversos errores. Algo parecido a una "plantilla" con información.



Cristales de caolinita, uno de los ejemplos de cristales de arcilla propuesto por Graham Cairns-Smith (NASA, dominio público)

Ahora pensemos que sobre esta plantilla física se van depositando determinadas moléculas orgánicas que también estarían disueltas en las aguas primitivas. Poco a poco irían adaptándose a las características de la arcilla, que a fin de cuentas está actuando como un catalizador inorgánico -necesitamos un catalizador para la primera síntesis del ARN-, aprendiendo su "información" e imitándola con mayor eficacia: la arcilla habría sido como el andamio sobre el cual se favorece la generación de un ácido nucleico, que quedaría como único agente al desaparecer el andamio.

Con ello obtendríamos cadenas muy cortas de ácidos nucleicos. Que tienen que crecer para llegar a ser un ARN plenamente funcional. La película continuaría a partir de la idea de que entre la variedad de estas cadenas de ácidos nucleicos generados sobre la catalizadora arcilla, alguna tuviera una estructura sui géneris que pudiera plegarse de forma tal que le permitiera comportarse como una enzima de ligamiento, lo que se conoce como *ligasa*. Esta

enzima ayudaría a unir a parte de las cadenas compañeras de nucleótidos, hasta llegar a un punto tal que algunos de estos nuevos polímeros pudieran también plegarse de tal forma que actuara como catalizador de la replicación de algún compañero resultante también de la acción de las ligasas, lo que se conoce como un ARN *replicasa*. Y con eso se podría haber llegado a un ARN primigenio replicador y enzimático.

La teoría no es una entelequia y puede ser posible, como así lo podemos comprobar en múltiples casos que observamos. La arcilla montmorillonita puede actuar como sustrato que promueve la polimerización de nucleótidos de adenina, uracilo y sus derivados. Incluso cadenas de ARN de hasta 40 eslabones. Además en su superficie este ARN permanece muy estable, más que en una disolución acuosa tridimensional. Es interesante también conocer el resultado de experimentos con priones –un tipo de proteína con un plegamiento erróneo de su molécula-, los cuales son capaces de unirse a partículas de arcilla y abandonar estas partículas cuando la arcilla se carga negativamente.

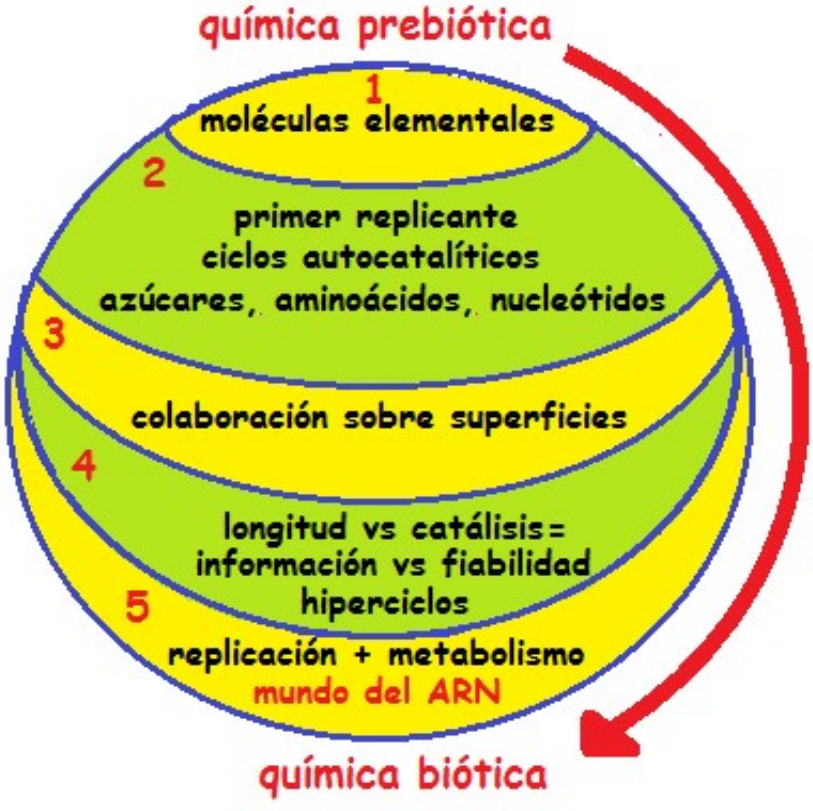
El mundo del ARN: hacia la especialización. Transmisión de información vs. Metabolismo

Vamos a hacer una pequeña parada para recopilar el camino avanzado hasta este momento desde la elemental química primigenia. Hemos hablado de moléculas con capacidad de replicación, con una cierta habilidad de colaboración enzimática, con una posibilidad de potencial informativo y de transmisión de dicha información, que evolucionaría vía mutaciones y selección natural. Es decir, unas moléculas bastante versátiles y en el umbral de las moléculas de la Vida. Estamos ya muy cerca.

Ampliemos ahora el foco. La Vida, tal como la conocemos, es una compleja maquinaria en la que podemos observar *dos funciones esenciales:* la del software, con la información, su manejo y transmisión, y la del hardware, con toda la maquinaria del metabolismo fabricando los ladrillos y consiguiendo energía para

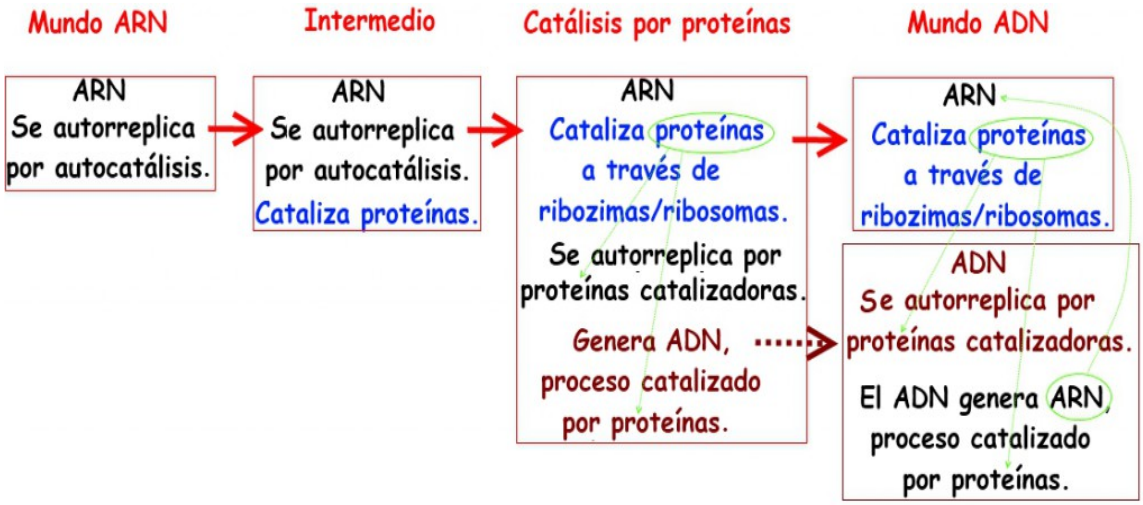
que todo funcione y así mantener un determinado fenotipo viviente. En los seres vivos actuales la primera función está en manos de los ácidos nucleicos, ADN y ARN, mientras que la segunda está en manos de las proteínas y sus componentes, los aminoácidos, con sus capacidades enzimáticas.

La duda que se nos plantea desde el escenario de la incipiente química biótica es si primero aparecieron los ácidos nucleicos, o primero las proteínas, o bien coevolucionaron a la par. La verdad es que no lo sabemos, aunque la mayoría de las opiniones más serias y contrastadas están por el hecho de que los ácidos nucleicos fueron los primeros, opiniones que se ven soportadas por lo que conocemos acerca de los que forman nuestros paquetes genéticos actuales. El ADN o el ARN dominan las características imprescindibles que definen a la Vida: Información y replicación. A partir de ahí todo lo demás.



Posible camino desde la química prebiótica al mundo de la especialización biótica (esquema de elaboración propia a partir de diversas teorías)

Nos encontramos así con un entorno dominado por los ácidos nucleicos que nos explicaría la esencia de la complejidad en las bases de la Vida. La teoría más aceptada en la actualidad es la del **mundo del ARN** que dice que la complejidad *metabolizar y replicarse***,** se basa en un precursor común de todas las formas de Vida, que sería el ARN o bien una molécula anterior menos desarrollada, el pre-ARN. La apuesta por este tipo de moléculas se basa en que sus descendientes actuales son capaces de gestionar varias funciones esenciales: hacen copias de sí mismas, son la base de datos del funcionamiento genético y metabólico, catalizadoras de reacciones metabólicas -al igual que las enzimas- y mensajeras de información, habilidades que al surgir dentro de un mundo evolutivo podemos asegurar que se debían encontrar, aunque de forma somera, en moléculas ancestrales. El dominio inicial de algo semejante a estas funciones les habría dado en el mundo protobiótico unas ventajas competitivas y evolutivas frente a otras formas de experiencias de vida.



Esquema del posible proceso de paso del mundo del ARN al mundo del ADN, con cesión de la función de catálisis a las proteínas por parte del primero. (A partir de información del libro "Orígenes: El universo, la vida, los humanos")

La fuerza de la presión del medio ambiente, la misma que había hecho aparecer el ARN, impuso una nueva versión de ácido nucleico que era mucho más estable por su estructura doble

helicoidal, el ADN, especializado en la información y la replicación, mientras que a las proteínas las seleccionó como las moléculas catalizadoras perfectas. El ARN tuvo que ceder la cartera de funciones a estos alumnos aventajados.

No puedo por menos que repetir aquí lo dicho un poco más arriba a la vista de que la selección darwiniana parece actuar también a nivel de moléculas: "… permite imaginar que quizás leyes o usos que encontramos en la biología también funcionan en las moléculas simples dentro del mundo de la química". La más simple química y la más sofisticada y compleja biología se manifiestan como una misma entidad.

Estación Término: el invento funcionó, la bioquímica compleja era ya una realidad.

En estos momentos la pregunta es:

Y ahora, ¿cómo continúa la historia?

Hasta aquí hemos desarrollado un posible camino que pudo iniciarse con el primer autorreplicante, al que poco después le dimos el nombre de *gen*. Como podemos deducir de la anterior historia, nuestro nivel de conocimiento es escaso y sólo nos ha permitido, hoy por hoy, el planteamiento de una serie de teorías e hipótesis que se esfuerzan en desenrollar el intricado pasado de las primeras biomoléculas, *teorías e hipótesis que están condenadas a cohabitar*. Ninguna de ellas es concluyente y quizá el hombre nunca sepa lo que pasó, aunque quizá, como otras veces en el mundo de la ciencia, la solución pasará por una síntesis de las hipótesis manejadas.

Y sin embargo no podemos dejar de pensar que aquello que pasó se intuye escondido en las pistas que siguen los investigadores y científicos, en los detalles que apuntan todos una clara orientación.

Experimentos como los comentados de Stanley L. Miller y Harold Urey son como una ventana abierta: un mundo posible está al otro

lado. Un mundo en donde se han sintetizado las moléculas orgánicas detectadas en el espacio interestelar, formadas posiblemente bajo la motorización de los rayos cósmicos. O un mundo no tan lejano, en nuestra Tierra, donde también han aparecido moléculas orgánicas, de forma aparentemente espontánea, en lugares con gradientes químicos o escalones de temperatura apreciables.

Y qué decir de los resultados de determinados ensayos de laboratorio, en donde en los matraces se han mezclado en disolución moléculas sencillas de ARN y los nucleótidos elementales que conforman su estructura molecular. Bastó el empujón de una enzima sintetasa para que empezaran a replicarse las moléculas de ARN de forma espontánea y veloz.

Y lo que parece más sorprendente. El investigador americano Gerald Joyce en 2005 consiguió sintetizar dos tipos de moléculas de ARN, con una gran efectividad (la muestra autoduplicaba su población cada hora) sin utilizar ninguna enzima: simplemente cada tipo de ARN era el catalizador del otro.

En desiertos californianos se han expuesto mezclas de aminoácidos, fosfatos de amonio y sales de magnesio a temperaturas comprendidas entre 65ºC y 70ºC, alternando con condiciones frías y húmedas, obteniéndose polipéptidos. Unos resultados similares se consiguieron trabajando con nucleótidos en vez de con aminoácidos.

El bioquímico Sydney W. Fox en 1965 sometió una mezcla de aminoácidos a temperaturas de 150ºC, consiguiendo macromoléculas que se comportaban física y químicamente como proteínas.

¿Y qué decir del natural comportamiento del ADN, que al calentarse pierde su configuración enmarañada? En este estado se le adhieren proteínas de forma espontánea, siendo una imagen del inicio del proceso de replicación.

Tantas y tantas esperanzas en que al final nos encontraremos con un camino que fue sencillo, asombroso y maravillosamente simple.

Quizás traer a colación todos estos ensayos y estudios parece más un circunloquio de teoría y praxis química, pero su único objetivo ha sido el acercarnos y familiarizarnos con la idea de que las moléculas orgánicas e inorgánicas no nacen en un acto de magia inexplicable, sino que son consecuencia inevitable de las reglas universales de funcionamiento del Cosmos. Y estas reglas estaban ya vigentes, por supuesto, en la joven Tierra del Hadeico. En algún lugar, mientras la Tierra estaba en la dura batalla de formación, se debió dar a la vez concentración de componentes, energía y estabilidad como para que la máquina echara a andar. Es de lo que hablaremos en el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 04:

1. Una enzima hace que una reacción química que es energéticamente posible, pero que transcurre a una velocidad muy baja, sea cinéticamente favorable, es decir, transcurra a mayor velocidad que sin la presencia de la enzima.
2. Para los más curiosos propongo leer esta publicación de la revista Nature de noviembre de 2012. "*Spontaneous network formation among cooperative RNA replicators*", Nilesh Vaidya et al.

05. La casa natal de la Vida

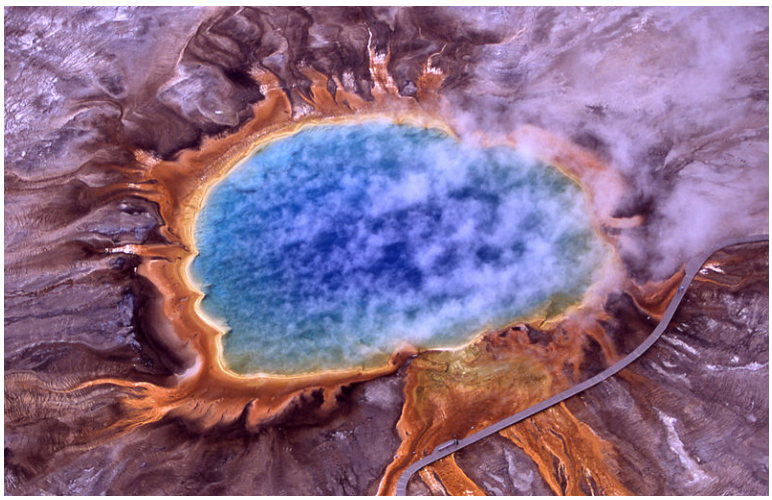
Hasta ahora hemos deambulado por el gran escenario donde surgió el milagro de la Vida, nuestra querida Tierra. Hemos visto también que la química prebiótica fue haciéndose, de forma espontánea, cada vez más compleja, hasta generarse un nuevo mundo, el del ácido ribonucleico, el ARN. Al final del capítulo anterior prometimos adentrarnos en las teorías que intentan explicar el lugar donde todo sucedió. Como lo prometido es deuda, vamos a por ello.

¿Cuál fue el escenario de lo que fue una inevitable maravilla?

Dada la imposibilidad material de obtener una fotografía real, vía restos geológicos o fósiles, hay que buscar las hipótesis más coherentes y posibles. Se barajan diferentes posibilidades: la Vida pudo aparecer en las aguas superficiales y cálidas de los protoocéanos, en charcas o marismas, o en las profundidades de dichos protoocéanos, junto a surgencias termales submarinas, ayudada quizás por plantillas de arcillas -moldes para la replicación por su geometría repetitiva- que ejercerían además una función catalizadora, favoreciendo las polimerizaciones de las moléculas que se depositaban sobre ellas y proporcionando la energía necesaria para la reacción.

La tesis de la sopa primigenia [1] en aguas someras presenta una serie de dudas. La principal es que, aun asumiendo la espontaneidad en la generación de las moléculas precursoras de los polímeros de la Vida, cosa que parece probada por múltiples experiencias en laboratorios, parece difícil que en unas aguas abiertas se produjera una concentración suficiente de estas moléculas como para que tuvieran la oportunidad de encontrarse con la suficiente asiduidad, interaccionar intensamente entre ellas y así crecer y evolucionar. Se ha argumentado que todo ello pudo pasar en zonas de aguas someras que, siguiendo los ciclos

meteorológicos, se inundaban para posteriormente secarse, favoreciendo así la concentración de las moléculas disueltas. Otra dificultad estribaba en el tipo de atmósfera existente. Ya hemos comentado que en los ensayos realizados por Stanley L. Miller y Harold Urey se había conseguido obtener biomoléculas al someter un ambiente reductor a la energía de descargas eléctricas. Una atmósfera reductora está compuesta básicamente de H_2, NH_3 y CH_4. Sin embargo en un momento de muy alta incidencia de las radiaciones ultravioletas estas moléculas no serían muy estables, ya que pasarían fácilmente a N_2 y a CO_2. No hay evidencias de que la atmósfera de la Tierra fuera reductora en aquella época y sí de lo contrario al final del eón. Entre medias… todo fue posible.



El Grand Prismatic Spring del Parque Nacional Yellowstone. Se supone que el ambiente de este lago con elevadas temperaturas y ambiente reductor sería similar al ambiente primigenio de los mares de la Tierra (Wikimedia, dominio público)

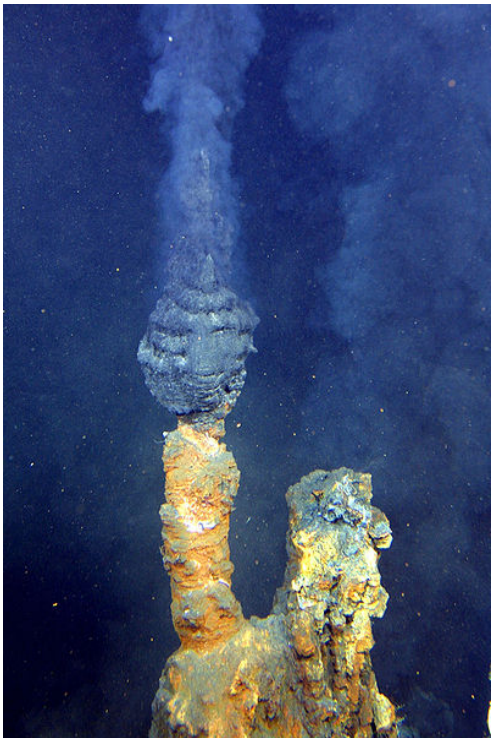
No obstante, los datos parecen indicar que la Vida empezó en una época muy temprana, y por tanto bien pudiera ser que apareciera en condiciones de una atmósfera reductora, cuando la disociación de sus moléculas aún no hubiera alcanzado un grado muy elevado. De todas formas, a esta temprana Protovida de la superficie del planeta le quedaba aún superar otro terrible inconveniente: el continuo bombardeo de meteoritos y cometas que caían sobre la superficie de la Tierra.

Hay alternativas a esta acta fundacional sobre la superficie de las aguas del planeta, también postulando mundos reductores, y que defienden que la Vida apareció en chimeneas hidrotermales submarinas, inicialmente catalizada por minerales. Se comenzó con las ideas de Günter Wächtershäuser, ya comentadas en el capítulo 03 "*La química se apunta a lo bío*", sobre el mundo del hierro y azufre, teoría que tomó gran solidez al ser descubiertas en el fondo oceánico este tipo de formaciones a lo largo del último cuarto del siglo XX. La teoría fue consolidada y perfeccionada más tarde, en 2002, por William Martin, de la Universidad de Dusseldorf, y Michael Russell, geoquímico del Jet Propulsion Laboratory de la NASA en Pasadena, California.

Hay dos tipos de chimeneas submarinas. Unas básicamente de tipo volcánico en las proximidades de las dorsales oceánicas (zonas en donde las placas tectónicas se separan, de lo que hablaremos en otros capítulos) bautizadas como **fumarolas negras**, y otras que son consecuencia de la desintegración que provoca el agua en las rocas de la placa oceánica, de forma continua y progresiva, y que se las conoce por el nombre de **venteos hidrotermales alcalinos**. El proceso en ambos modelos se inicia cuando el agua en el fondo de los océanos permea el suelo y llega a zonas de magma o próximas a él, donde se sobrecalienta y vuelve a brotar como una especie de geiser submarino, en el caso de las fumarolas, o un incesante y suave borboteo, en de los venteos. No obstante, la química de ambos tipos de chimenea es distinta.

Las *fumarolas negras* aparecen como estructuras en forma de chimenea que emiten nubes de material de color negro, arrastrando partículas con un alto contenido de minerales de azufre, como la pirita (sulfuro de hierro), CO_2 e iones metálicos, a unas temperaturas próximas a los 400ºC y con **un alto grado de acidez**. Cuando se encuentran con las frías aguas del océano, muchos minerales precipitan, especialmente en forma de sulfatos de calcio –anhidrita- recubiertos por precipitaciones de sulfuro de hierro, formando la chimenea alrededor de la surgencia, con una estructura muy compartimentada y porosa. Estas chimeneas tienen

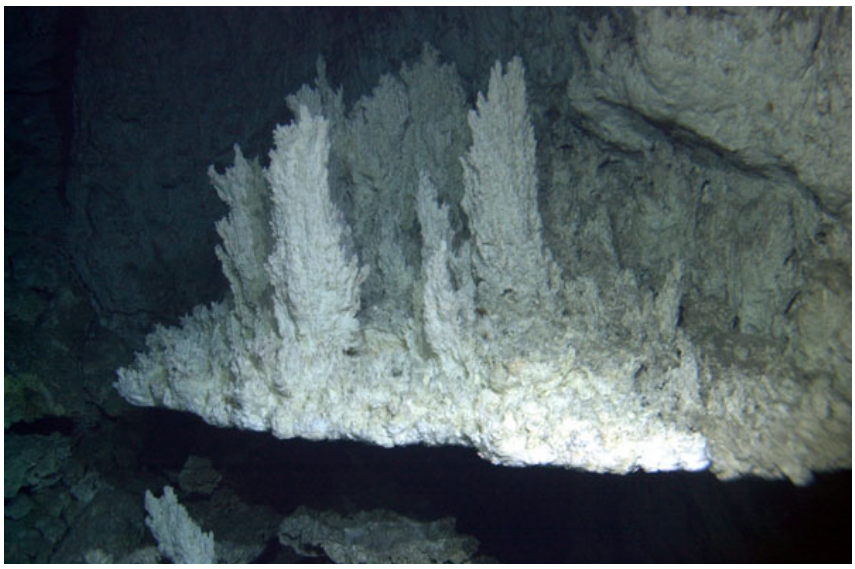
crecimientos muy rápidos, alcanzando en poco tiempo grandes alturas, lo que les confiere una gran inestabilidad.



Fumarola negra con estructura de sulfuro de hierro y sulfato de calcio (Wikimedia, dominio público)

Los *venteos hidrotermales alcalinos*, como los del campo conocido como Lost City en el océano Atlántico, son distintos. Se producen alejados de las dorsales oceánicas y presentan unas temperaturas más modestas, en el entorno de 40ºC a 90ºC. El agua del mar que se infiltra por las fisuras de la corteza oceánica constituida básicamente por peridotita, una roca ígnea, se calienta y reacciona con el abundante mineral de hierro y magnesio que allí se encuentra, produciendo **un entorno de alta alcalinidad**, es decir con pocos protones H^+, y flujos ricos en metano CH_4 e hidrógeno H_2, y con concentraciones de minerales de calcio, bario o silicio que le dan su característico color blanco. Al contrario que en las fumarolas negras, en este tipo de venteos no se producen cantidades significativas de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno o iones metálicos. Al mezclarse la surgencia con el agua del mar, que se encuentra a unos 2ºC y con CO_2 disuelto, sus iones

precipitan, produciéndose carbonato cálcico y formando así unas chimeneas de hasta 60 metros de alto con una gran estabilidad. La estructura de estas chimeneas presenta unas formas porosas llenas de microcavidades.



Venteo alcalino con estructura de carbonato cálcico (Wikimedia, dominio público)



Formación calcárea de Lost City. En las porosidades de este tipo de paredes pudieron darse las condiciones necesarias para iniciarse la Vida (Wikimedia, dominio público)

En ambos tipos de fumarolas se encuentran numerosas especies de extremófilos y otros tipos de organismos viviendo en sus proximidades. Son de reseñar las poblaciones de bacterias quimioautótrofas que basan su metabolismo en los compuestos del azufre. Más tarde, en otros capítulos, veremos la importancia de este tipo de bacterias en la evolución de los seres unicelulares.

Ahora bien, hace 4 mil millones de años, cuando suponemos el inicio de la Vida, las condiciones del mar eran distintas. Las aguas serían muy ricas en hierro en su forma no oxidada de ión ferroso Fe^{2+}, ya que entonces el oxígeno era aún escaso, mientras que el fluido exhalado por las surgencias submarinas debía contener bastante ión hidrosulfuro HS^-. Estos dos iones se combinarían produciendo pirita FeS_2 liberando mucho H^+ que a su vez reaccionaría con el anhídrido carbónico disuelto en el agua produciendo biomoléculas. Conociendo estas circunstancias se ha intentado reproducir en el laboratorio lo que pudo pasar en la superficie de los fondos marinos durante el Hadeico, en un momento en que imaginamos que los venteos debieron ser muy abundantes. Efectivamente esto debió ser así, ya que, en los ensayos, al inyectarse una solución de SNa_2, parecido al fluido hidrotermal, en disoluciones de Cl_2Fe, que simula bien las condiciones del hierro en el mar de aquel entonces, se observó que precipitaban unas estructuras de SFe porosas, material semejante al de las chimeneas hidrotermales.

No parece por tanto una entelequia el suponer que durante el eón Hadeico en los fondos oceánicos, sobre la corteza de la litosfera submarina, se dieran este tipo de fenómenos y estructuras: las leyes de la química y de la termodinámica han sido siempre las mismas, tanto hoy como hace millones de años.

Así que imaginemos un primitivo venteo alcalino, posiblemente con más diferencia de temperatura con el agua que le rodeaba, quizás presentando alguna de las características químicas de las fumarolas negras: el magma estaba demasiado próximo y caliente, lo cual favorecería su proliferación. En estos venteos, o lo que fuera, energizados por los motores que suponen los gradientes químicos y térmicos que allí se producían, se encontrarían variadas moléculas e iones que se irían haciendo cada vez más complejos. De la corteza ascendían arrastrados por el caliente flujo de agua, una química alcalina, sencillas moléculas de hidrógeno y de CH_4, compuestos de azufre y nitrógeno en forma de amoniaco, además de otras moléculas e iones, todas ellas necesarias para formar los ladrillos de la materia orgánica y para iniciar el proceso de obtención de la imprescindible energía vital. Por otro lado, el mar era menos caliente y ácido, debido esto último a la gran concentración del CO_2 disuelto en aquellos momentos como resultado de la abundancia de este gas en la atmósfera hadeica y de la alta presión atmosférica a nivel de mar. A pesar de la baja concentración de oxígeno en el mar, los silicatos de hierro ferroso se iban oxidando lentamente a hierro férrico, liberando iones de H^+. Abundaban también los iones de níquel y de compuestos fosfatados. Las diferencias de pH -alcalino en la surgencia, ácido en el mar-, de temperaturas -caliente en la surgencia y fría en las aguas libres- y de concentraciones iónicas entre el flujo del venteo y las aguas del fondo oceánico, se constituyeron en dinámicos impulsores químicos de lo que pasaba en la zona de mezcla.

Un micromundo en donde abundaban el dióxido de carbono, hidrógeno, fósforo, nitrógeno… *todos los materiales para construir moléculas orgánicas*. Iones de níquel y hierro que reaccionaban con el sulfhídrico de las emanaciones formando moléculas de SFe y SNi, con un tremendo *potencial energético* basado en su fuerte capacidad redox, con la que impulsarían las cadenas de electrones que creaban la energía necesaria para tan complicada fábrica. Un campo de protones que empujaban en la

misma dirección (entenderemos mejor estos procesos tras la lectura de un capítulo posterior). Un *universo de materiales y energía*.

Faltaba sólo el cobijo en donde estos dos actores principales de la alquimia se concentraran, preservaran y colaboraran.

Las porosidades de las estructuras calizas de las chimeneas eran el alojamiento ideal para el proceso, mientras que su recubrimiento por sulfuros metálicos suministraba una continua fuente de electrones energéticos para la química prebiótica, lo que, unido a su potencial catalizador, formaba un escenario ideal para las polimerizaciones. Básicamente los mismos catalizadores, hierro de muy distintas clases, níquel y sulfuros de molibdeno que utilizan actualmente las células para acelerar la captura y conversión del CO_2 en moléculas orgánicas.

Sabemos que desde una edad temprana se dieron las circunstancias que pudieron hacer posible la aparición de una "protovida" química aún no biológica. Aquellos activos autorreplicantes a los que gustaba colaborar en el medio donde se encontraban. Ahora y aquí, en este momento de la biografía de la Vida, junto a las chimeneas hidrotermales submarinas del Hadeico, hemos dado un paso más y nos encontramos casi en el mundo del ARN.

Ya sabemos que el mundo de los precursores del ARN es la imagen más probable de lo que surgió en estos escenarios. Pequeñas moléculas del tipo ARN que interaccionaban entre ellas, acoplándose de acuerdo con las leyes termodinámicas y químicas en el interior de los minúsculos recovecos del cuerpo de las chimeneas de los venteos. Unos entes que se autoconstruían y se duplicaban primero por la acción catalizadora del vecino, más tarde por su propia autocatálisis, y que encontraban en el interior de las porosidades una química que les dotaba de materiales de repuesto y energía para su replicación. Los precursores del mundo del ARN dentro de las porosidades se irían haciendo también más complejos.

Algunos de estos precursores actuarían ya como enzimas "ayudando" a otros a replicarse o a unirse formando unas cadenas más largas. Se producirían hiperciclos de colaboración. La selección natural haría el resto al dejar paso sólo al más competitivo y eficaz, y eliminar el resto. Las protocélulas generarían así su material informativo, su ARN preferido. Y como el ARN de un retrovirus, el campeón se expandiría a otros poros de la roca en los que también sería el campeón. Probablemente seguiría su trabajo automático de configuración propia y del medio celular, por un lado evolucionando cada vez más a formas muy sofisticadamente enmadejadas, "herramientas 3D", con las que podía favorecer encuentros moleculares consolidando una función enzimática. Y por otro lado hacia formas sencillamente estructuradas, ideales para una replicación con pocos errores, orientándose hacia una molécula cada vez más parecida al ADN. Así, hasta que inventó una "fórmula proteína" que catalizaba mejor que él y un ácido nucleico que replicaba mejor que él, el ADN. Y tuvo que cederles la antorcha.

Es sorprendente como en el mundo de los virus se observan tipologías que parecen el reflejo de lo que pudo pasar. Los más complejos poseen un genoma de ADN, pero los más sencillos, que pueden ser supervivientes de la época del mundo del ARN, lo tienen de este ácido nucleico con muy pocos nucleótidos. Desde los *viroides* que son incapaces de codificar la proteína que precisan para su autorreplicación, pasando por los un poco más complejos *Deltavirus* en donde conviven un gen y una proteína enzimática que no es la que precisa para replicarse, hasta llegar a los *Narnavirus* en los que la proteína acompañante de su gen es producida por él mismo y es precisamente la que cataliza su propia replicación. Es decir, desde un trozo de ARN que necesita que alguien le ayude en su replicación, pasando por ARN's que conjugan un gen y una enzima, primero independientes y después perfectamente ligados en sus funciones.

En esta aventura, el ARN obtendría la energía de una forma similar a como la obtienen las bacterias que actualmente viven en las

fumarolas y venteos submarinos: a partir de los gradientes de protones y de la energía de enlace de los compuestos de azufre ayudados por el poder oxidante de los abundantes iones metálicos. Y la almacenarían para su actividad apoyándose en una molécula, el acetiltioéster, abundante de forma natural en el mundo hidrotermal submarino, que se produce fácilmente mediante el ataque de radicales libres de hierro y azufre sobre el dióxido de carbono. Esta molécula hace funciones semejantes a las del adenosín trifosfato, ATP, las pilas de energía de prácticamente todas las células vivas.



Bacterias fototróficas que viven cerca de una fumarola negra frente a las costas de México a una profundidad de 2.500 metros (Wikimedia, dominio público)

Todo nos lleva a imaginar un resumen poco menos que sorprendente: *el ancestro común más antiguo de los seres vivos no fue una célula, sino unas rocas producidas en una fumarola alcalina*, con paredes catalíticas compuestas de hierro, níquel y azufre, y energizadas por un gradiente natural de protones resultante de la oxidación de los minerales sulfurosos. En sus solitarias y recónditas porosidades se gestaron complejas moléculas que ya jugaban con los *atributos* que hoy tienen los seres más

simples, las bacterias quimioautótrofas, organizando el código genético, montando el ribosoma que es la fábrica celular de proteínas, seleccionando al ADN, desarrollando un núcleo elemental de metabolismo suficiente como para suministrar los componentes que necesitaría para su replicación, aprovechando la energética química redox y mediando como enzimas catalizadoras de ATP, todo ello en un entorno individual y aislado.

Este ser casi mineral que se encontraba en la frontera de la Vida estaba presenciando el albor de la revolución bioquímica, cuando los genes y las proteínas se diversificaban llevando a cabo millares de nuevas y diferentes funciones, cuando el ARN y los sulfuros de hierro fueron sustituidos como catalizadores principales por las proteínas y cuando la química biológica empezó a diversificarse y tomar cuerpo.

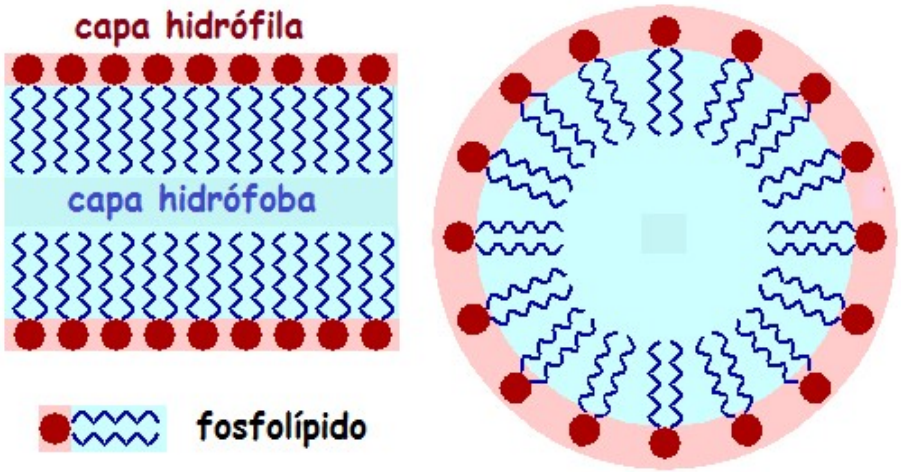
Ahora sólo le faltaba volar independiente y lejos de la estructura mineral de los venteos. Necesitaba algo parecido a un traje espacial que reprodujera su ambiente protector natal, un traje lo suficiente maleable como para que su química se pudiera enriquecer en el nuevo medio marino donde iban a ser pioneros, haciendo posible que entes hijos heredaran su autonomía e independencia. Para ello necesitamos dar un nuevo paso en esta historia, subir un escalón más apoyándonos en las **membranas lipídicas**.

Aclaremos en que consisten estas membranas.

Sólo hay que acudir a la naturaleza, o simplemente lavarse las manos, para ver cómo aparecen de forma espontánea burbujas, micelas, de una finísima capa que encierra aire. Se ha observado en el laboratorio que en disoluciones de fosfolípidos se generan este tipo de micelas y membranas, que van creciendo por adición de más y más fosfolípidos libres, y que se dividen de forma espontánea dando micelas hijas capaces de continuar el mismo proceso. Algo con lo que ya se encontró Oparin al estudiar sus coacervados, tal como se comentó en el capítulo segundo de este libro, "*Algunas generalidades*".

Los fosfolípidos son moléculas muy largas, que en un extremo tienen un grupo fosfato normalmente con una carga negativa, siendo el otro extremo completamente apolar -sin manifestación de carga eléctrica-. Por otra parte tenemos a la molécula de agua que tiene un carácter bipolar, ya que al tener el núcleo de su oxígeno mayor cantidad de protones con carga eléctrica positiva -ocho- con relación a los que tiene el hidrógeno -uno-, se produce una desviación hacia el primero de la población de electrones negativos de la molécula.

La consecuencia es que la molécula de agua presenta una carga negativa cerca del oxígeno y una positiva cerca de los hidrógenos. Mezclamos agua y lípidos y ¿qué pasa? Que los polos de cargas opuestas se juntan, mientras que los extremos no polares huyen del agua y se refugian entre ellos. Resultado: una membrana formada por una doble capa de lípidos con sus extremos polares hacia fuera. Cuando estas membranas lipídicas se doblan aproximando sus extremos, se unen formando una burbuja. Esto sucede de forma espontánea ya que esta estructura equivale al estado de mínima energía para los agregados de estas moléculas.



Una bicapa lipídica (izquierda) y una micela (derecha) (a partir de Wikimedia, GFDL)

Las primeras membranas celulares tuvieron que provenir de esta circunstancia física al configurarse una micela que encerraría a una

disolución de muchas y variadas moléculas, formando así un perfecto foro de encuentro entre ellas. De hecho las membranas de las células y de sus núcleos tienen esta constitución molecular. Que además de su estanqueidad para el desarrollo de la vida presentan otra ventaja, ya que son parcialmente permeables según el tamaño de las moléculas: permiten el paso a los monómeros con los que se construyen los ácidos nucleicos y las proteínas, y a la vez la salida de los productos de desecho del metabolismo.

Pero en la situación de inicios de la bioquímica la creación de largos fosfolípidos era muy compleja, debido precisamente a su longitud. El proceso, por tanto, debió de ser lento, como sucedió con tantos otros que hemos analizado hasta ahora: la evolución habitualmente es así, un rosario de pequeños escalones. Todo comenzaría con un pequeño lípido, quizás producto residual de algún ciclo autocatalítico, que se quedó pegado sobre la superficie que contenía a una disolución repleta de solutos. Este lípido adosado a la superficie influyó sobre su ambiente ya que al rechazar al agua en su entorno por su carácter hidrofóbico crearía algo así como una burbuja de moléculas "vacía" de agua que iba abriendo camino a otros lípidos, los cuales crecían al interrelacionarse entre ellos. En principio formarían como una pequeña mancha de aceite en el agua, pegada a la pared de pirita dentro de un pequeño poro de la roca. Con el tiempo esta mancha, ya cohesionada como una membrana, se abombaría dejando un espacio de "agua en aceite" entre ella y la roca, formando una burbuja, una especie de protocélula fija sobre el sustrato. A través de la membrana pasarían moléculas muy simples como el CO_2, quedando en su interior algunos ciclos autocatalíticos autótrofos -quizás unas sencillas cadenas de ARN autorreplicantes- con su metabolismo incipiente, siendo la superficie pirítica la suministradora de iones y energía.

Con ello se consiguió un entorno aislado en donde se desarrollaba la bioquímica de la forma necesaria como para que aumentara la entropía del conjunto, permitiendo el que se incrementara el orden, a costa de disminuir la del exterior gracias a una energía que

entraba al sistema a través de la membrana fosfolípida. La base del delicado equilibrio dinámico de la homeostasis vital.

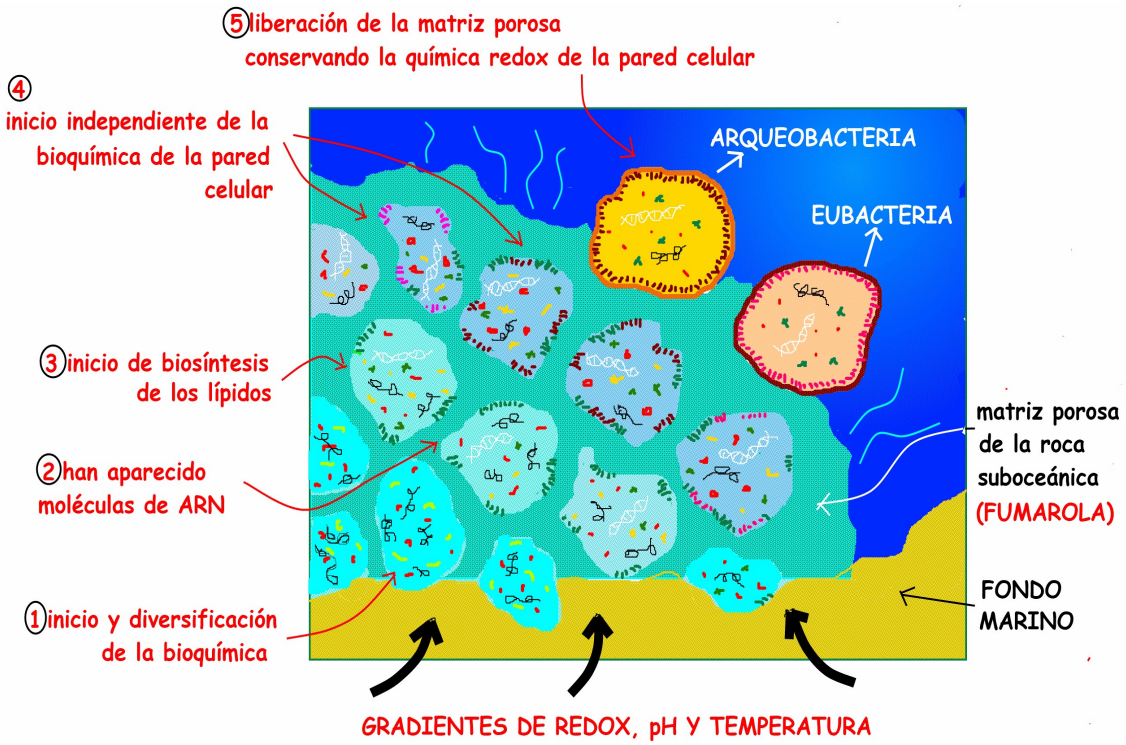


Diagrama de la teoría de Martin y Rusell: desde la primera química de la vida confinada en los poros de los venteos submarinos hasta la aparición de células libres.

Poco a poco el abrigo de las porosidades se fue haciendo innecesario al desarrollarse las primitivas vesículas fosfolipídicas. En algún momento de la diversificación de la bioquímica se traspasó a estas membranas las funciones de bombeo de protones y las funciones redox que hasta entonces venía desarrollando el sulfuro de hierro de las paredes de roca que las albergaba. La membrana debía ser ya prácticamente procariota,[2] al menos en su estructura, y seguramente fue en este momento en que se desarrollaron dos diseños, a la vista de las distintas bioquímicas alcanzadas en las membranas de las eubacterias y de las arqueobacterias, los seres vivos más ancestrales. Quizás en estos mismos instantes, coevolucionando a la par de las membranas orgánicas, se estaría pasando del mundo del ARN replicante y

enzimático, al mundo cooperante de ADN-ARN-proteínas, cada uno con su función. También a la par que iba sucediendo lo anterior, los incipientes genomas circulares de ADN se irían complicando por duplicaciones o transmisiones horizontales entre diversas "células", en un camino evolutivo de mayor eficacia en su codificación de información y en su replicación con escasos errores.

Con los procesos químicos vitales ya automantenidos, un ser vivo independiente pudo liberarse de su cárcel pétrea y salir a las aguas libres a practicar su quimioautotrofismo. Sobre el fondo marino afincaron su vida aprovechando el CO_2 disuelto y la energía química de los compuestos de sus lechos. A medida que iban muriendo, sobre el fondo marino se comenzaba a sedimentar materia orgánica que sería mucho más tarde utilizada por las grandes células heterótrofas que tardarían aún mucho en llegar. Lo anterior constituye la revolucionaria teoría de los ya mencionados profesores William Martin y doctor Michael Russell.

Sea o no sea cierta la hipótesis anterior, alguien tuvo que ser el primero. Según el genetista Andrés Moya, tal como dice en su libro "*Simbiosis*", parece ser que teóricamente con 208 genes una célula tiene lo mínimo para replicarse y metabolizar. Y hay serias evidencias de que todos los seres vivientes que somos y han sido tenemos un ancestro común al que ya introdujimos en el capítulo 03 "*La química se apunta a lo bio*", el **LUCA** -***L**ast **U**niversal **C**ommon **A**ncestor*, Último Antepasado Común Universal- que contaba con 600 genes. Hay diversas teorías al respecto, aunque la más extendida es la que dice que la Vida apareció una sola vez sobre la Tierra, pero nadie puede asegurar que no se hubieran dado otros brotes hoy perdidos en el camino, desaparecidos al verse incapaces de resistir la presión evolutiva o que permanecen escondidos en lugares no explorados del planeta. Éstas son las evidencias que nos permiten asegurar la existencia del antecesor común. Podemos suponerlo cuando observamos que los procesos metabólicos más comunes están extendidos en todos los seres vivos. Lo deducimos a partir de la sorprendente y ancestral

coincidencia de que los mismos genes expresan las mismas proteínas en toda la comunidad histórica de organismos vivos. Que así nos lo indica el constatar la existencia de un atávico y único código genético a nivel planetario. Y está demostrado largamente a partir de los estudios realizados sobre la evolución de genes que nos permiten husmear en su árbol genealógico. Hemos podido retrotraernos con absoluta seguridad hasta el LUCA mediante análisis genéticos con los que se siguen la pista a unos cien genes (lo que suponemos significa el 6% de la cesta de protogenes de tan venerable abuelo) existentes en el acervo actual de la biosfera.

A partir de ahí siguen aún abiertas muchas preguntas: ¿cómo se las apañó la primera protobacteria cuando abandonó la primera chimenea calcárea?, ¿cómo llegó a colonizar otras chimeneas u otros ambientes?, ¿cómo fue evolucionando el metabolismo que le permitió esta hazaña?

La lectura de éste capítulo no nos esta dando certezas absolutas, y seguiremos manteniendo los interrogantes. Efectivamente, todo son hipótesis y no se sabe con certeza cómo y cuándo apareció la Vida, aunque las pistas son esclarecedoras y, para el que precise certezas, podríamos decir que también son esperanzadoras. Parece casi una evidencia que el proceso fue ineludible, ya que los resultados de los ensayos teóricos parecen confirmar la casi espontaneidad de todos los procesos necesarios, también corroborado por las evidencias geológicas y bioquímicas que nos llevan a pensar que se produjo en un momento muy inicial de la vida de la Tierra, posiblemente más allá de hace 3.800 millones de años. Y si efectivamente tenemos un ancestro común, todo parece indicar que hay que apostar por la mayor probabilidad de unos hechos encadenados por la evolución y la selección natural, una cadena de sucesos que sin necesidad de magias hicieron posible que la Vida se extendiera por doquier.

Y hasta aquí la historia hadeica. En aquel momento final de época, vibrando aún con los últimos rumores del Bombardeo Tardío, nos hubiera asombrado el juego de los astros. El Sol, menos brillante

que hoy en día, atravesaría rápidamente el arco del cielo, quizás al doble de velocidad que ahora, mientras que la Luna muy próxima aparecería cada noche aterradoramente grande sobre nuestras cabezas.



Representación artística de la Tierra saliendo del eón Hadeico (composición propia a partir de NASA, dominio público)

La Tierra era una bola brillante, un globo de agua, festoneada por unas placas áridas cubiertas de pústulas volcánicas. El viento y el agua degradaban estos inicios de continentes depositando el resultado en el fondo del mar, en donde crecían capas de sedimentos de gran espesor. Nada de color verde sobre las escasas tierras estables, ningún movimiento a excepción de remolinos de polvo, las torrenteras desbordantes y el correr de las lavas. La atmósfera parecida a la actual, aunque sin oxígeno, se había ya aclarado: dominaban el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno y el agua. El cielo, posiblemente, dada la gran cantidad de vapor de agua en la atmósfera, era tan azul como el que conocemos y los amaneceres y atardeceres no serían tan rosados o rojos al no estar la atmósfera tan contaminada por el polvo, aunque seguramente todo sería menos luminoso porque así lo era el Sol de entonces. El mar templado y ácido ocupaba la cubeta que formaba la placa oceánica, sujetándose sobre un magma muy caliente que de vez en

cuando hacía valer su poder agrietando este fondo marino. La Vida primigenia bullía en el agua, tan sólo en el agua. Primitiva y abundante. Esperando el siguiente eón para agarrarse a cualquier oportunidad y conquistar cualquier nuevo recoveco.

Y así lo veremos a partir del siguiente capítulo en donde daremos los primeros pasos por el eón Arcaico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 05:

1. Consiste en la hipótesis por la que en las condiciones que se dieron en la tierra hace millones de años, en algún lugar de su superficie, se constituiría un caldo primitivo primigenio rico principalmente en carbono, nitrógeno e hidrógeno, en el que, al verse expuesto a los rayos ultravioletas del Sol y a la energía eléctrica generada por las tormentas atmosféricas, se generaron unas estructuras simples de ARN, versión primitiva del ADN, base de las criaturas vivas.
2. Se llama **procariota** o **procarionte** a las células sin núcleo celular definido, es decir, cuyo material genético se encuentra disperso en el citoplasma, reunido en una zona denominada nucleoide. Por el contrario, las células que sí tienen un núcleo diferenciado del citoplasma se llaman eucariotas y son aquellas cuyo ADN se encuentra dentro de un compartimento separado del resto de la célula.

06. Entramos en el eón Arcaico

Por fin llegamos a un nuevo eón, el Arcaico, con la Vida ya organizada tal como lo estuvimos presenciando en los capítulos anteriores. A partir de ahora vamos a empezar a movernos con organismos perfectamente estructurados, las bacterias, y sus manuales de funcionamiento. En este capítulo haremos una introducción general sobre estos seres vivos elementales, los primeros, y hablaremos acerca del escenario por donde se movían hace la friolera de entre 3.800 y 2.500 millones de años… es decir, a lo largo del eón Arcaico.

El nombre *Arcaico* proviene del griego antiguo "Αρχη", que significa "comienzo, origen". También a este eón se le conoce por el nombre de Arqueozoico, es decir "comienzo de la vida" (zoicos, vida en griego). Abarca el 29% de la edad de la Tierra y es un periodo lleno de acontecimientos: recoge el testigo del Hadeico y lo consolida, dejando el escenario con todos los elementos para la representación teatral que hoy conocemos. En él se asienta la riqueza de las vías metabólicas, y por tanto dedicaremos una explicación teórica sobre ello.

Al comenzar el periodo, la Tierra aún estaba saliendo del episodio del *bombardeo tardío*, iluminada por un sol pálido, con una dinámica tremenda en la que juegan mares de agua, episodios magmáticos y pequeñas cortezas solidificadas. La vida, casi con toda seguridad, había empezado a experimentar en aguas someras o en venteos hidrotermales submarinos. De cualquier forma, se tratarían de bacterias primitivas.

Al finalizar el Arcaico la Tierra se habrá convertido en un cuerpo estable con grandes continentes surgiendo de un mar tibio, colonizado desde hacía más de mil millones de años por bacterias fotosintéticas que prepararon el siguiente salto evolutivo de la Vida.

No son muchas las rocas que se conservan de este eón, de gran actividad geológica, que han tenido que sufrir hasta hoy más de 2.500 millones de años de ciclos de erosión y sedimentación, presión y subducción, fusión y vulcanismo, solidificación y plegamiento. Y vuelta a empezar. En realidad, sólo el 0,5% de las tierras de hoy en día corresponden a aquella época.



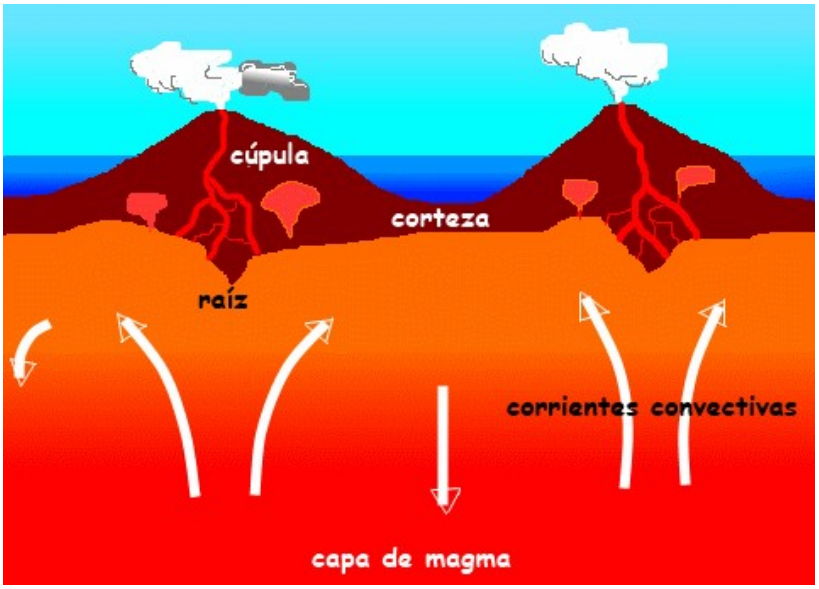
Distribución actual de rocas procedentes del Arcaico

El motor de este tejer y destejer son las tensiones energéticas que en cada momento tiene el conjunto del planeta, su magma y su corteza. A comienzos del Arcaico el flujo de calor de la Tierra era casi tres veces superior al que tiene hoy y el doble que a principios del siguiente eón, el Proterozoico (hace 2.500 millones de años). Se contaba, por tanto, en esta era con un buen motor para la formación y deformación de la litosfera.

Centrémonos en el manto magmático. En él se darían zonas con distintas temperaturas. En los puntos calientes del magma las fuertes corrientes convectivas ascendían con más energía y más materia, por lo que sería fácil que en algunas zonas más frías de la superficie se fuera acumulando suficiente cantidad de material

como para formar un germen de corteza estable, que progresivamente se iría enfriando con relación a su entorno, favoreciendo su crecimiento que iría así modelando una isla de roca. En estos puntos se formarían grandes cúpulas de materia enraizadas en el manto fundido.

El resto de las corrientes convectivas magmáticas, las que no se habían solidificado, serían desviadas por estas raíces concentrándose en puntos calientes que no permitían su desarrollo y que dieron como resultado una placa litosférica local de menor espesor. Posiblemente este fenómeno magmático se dio en zonas que correspondían a los fondos oceánicos.



Explicación verticalista del origen de la corteza arcaica

La teoría cúpula-raíz parece tener evidencias. La alta temperatura de la Tierra en aquellos momentos, con un magma profundo muy caliente y fundido, puede hacer pensar que el límite "magma fundido-litosfera" debía ser muy poco profundo a lo largo de toda la superficie del planeta. Sin embargo se han encontrado materiales –diamantes- que sólo se pudieron generar a temperaturas que se daban a unos 150-200 kilómetros de la superficie. Eso indica que en algún punto la litosfera penetraba al menos hasta esta profundidad, como una especie de raíz inserta en el magma.

Dentro de este esquema se supone que debía haber una **gran actividad tectónica,** dados los altos flujos energéticos del momento que imprimían una gran velocidad al proceso de generación de la litosfera. Cabría esperar que hubiese una mayor actividad en las *dorsales suboceánicas* (líneas de rotura de los fondos oceánicos) y además un mayor número de ellas, así como también un mayor dinamismo en las *zonas de subducción* (zonas en donde la litosfera oceánica deslizaba bajo la continental). Esta dinámica impediría que los cratones[1] tuvieran tiempo de crecer hasta un gran tamaño. Como consecuencia habría un mayor número de placas solidificadas y de tamaño no muy grande, con una gran movilidad y deformación, ya sea producida por las colisiones entre ellas como por las aportaciones de materiales volcánicos: **la norma eran los pequeños y dinámicos protocontinentes**.

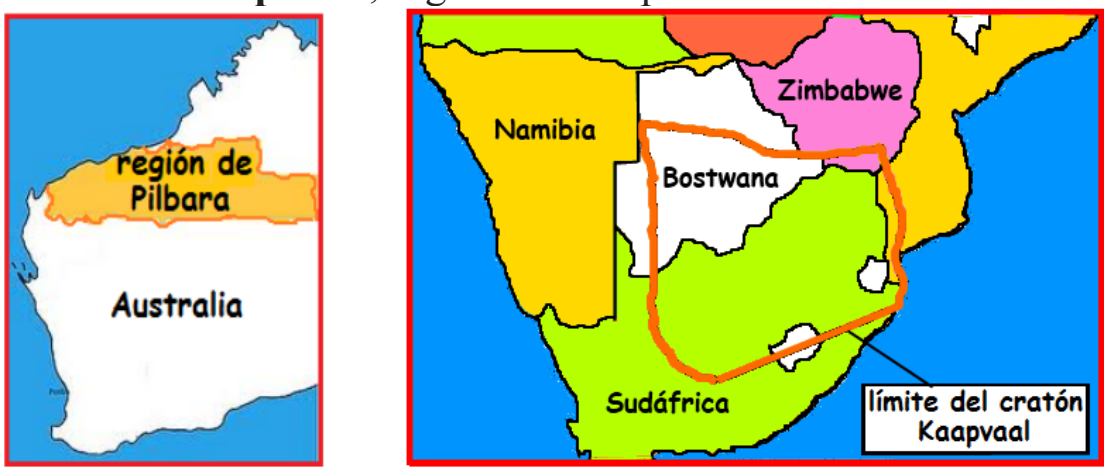
Debido a ello las costas serían abruptas, sin zonas de aguas poco profundas, por lo que los residuos de la erosión de las microplacas quedarían depositados en la profundidad de las aguas, junto a ellas, generando unas capas sedimentarias de gran espesor, de hasta 30 kilómetros. Estos sedimentos metamorfizados lentamente por la presión constituyen la parte profunda de la actual litosfera. Entremezcladas con estos minerales se encuentran franjas compuestas por una gran variedad de unidades rocosas no homogéneas y de formas extrañas, compuestas por silicatos de hierro o magnesio, llamadas "*cinturones de rocas verdes*". En esta época nuestro conocido hierro bandeado, del que ya se habló en un capítulo anterior, seguía su formación.

El *hierro bandeado* es muy significativo desde el punto de vista de la biosfera. Durante el anterior eón el oxígeno básicamente se encontraba asociado en complejos moleculares, como el agua, el dióxido de carbono o los silicatos de la litosfera.

Sin embargo las capas de óxido de hierro de esas formaciones rocosas, que alternan con capas de silicatos degradados, indican que ya había oxígeno molecular libre en proporciones apreciables.

Y eso quiere decir que **ya había bacterias con metabolismo fotosintético oxigénico**, emitiendo O_2 como materia residual de su metabolismo. La opinión más generalizada es que las primeras bacterias que dispusieron de esta habilidad datan de hace 2.800 millones de años, aunque algún estudio[2] basado en el estudio de hematitas -óxidos de hierro- parece adelantar la fecha hasta hace 3.460 millones de años.

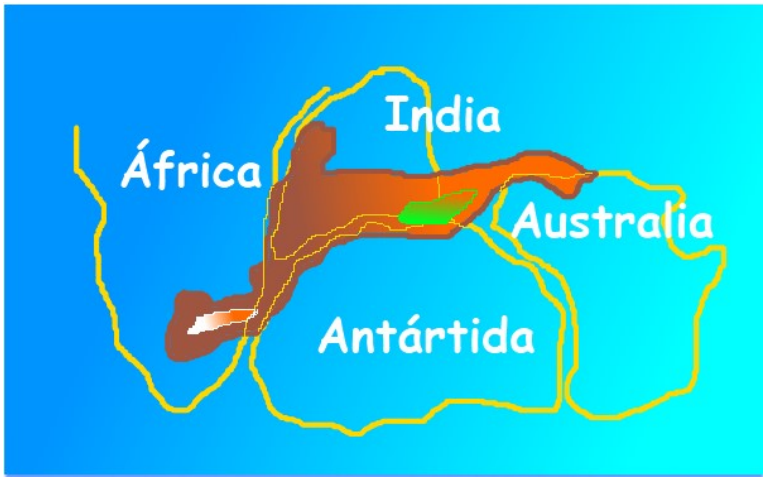
A medida que la Tierra se iba enfriando, las microplacas se fueron estabilizando en un largo proceso continuo que duró hasta el final del Arcaico. En este momento, y por motivos desconocidos, a pesar de que los flujos energéticos se habían atemperado a la mitad desde el inicio del eón por el propio enfriamiento del planeta, se produjo un resurgimiento de la actividad magmática, de forma que al acabar el Arcaico se había formado ya, y en un corto intervalo de tiempo, el 50% del total de la corteza continental actual, y habían aparecido los primeros grandes continentes y las secuelas de la actividad geológica sobre ellos. Se iniciaba con ello la **dinámica de tectónica de placas**, según el concepto actual de la misma.



Localización de los pequeños cratones de Pilbara y Kaapvaal

Vaalbará es el nombre del primer e hipotético supercontinente que apareció sobre la Tierra, hace unos 3.500 millones de años. Su existencia se justifica en los estudios geocronológicos y paleomagnéticos de dos cratones arcaicos -aún no podían ser considerados propiamente como continentes-: Kaapvaal

(denominado así por la provincia sudafricana de Kaapvaal) y Pilbara (de la región de Pilbara, en Australia Occidental).



El pequeño cratón de Ur con indicación del perfil de los territorios actuales

Con posterioridad aparecerá **Ur**, hace 3.000 millones de años, del que se sabe muy poco excepto que sus restos se encuentran en la actual India, Madagascar y Australia. Posiblemente en su momento fue un único y solitario continente, a pesar de ser muy pequeño. Su nombre viene de la misma palabra alemana que quiere decir "original".

Kenorland, o también llamado **Ártica**, fue ya un **supercontinente**, uno de los más tempranos sobre la Tierra. Se cree que se formó hace unos 2.700 millones de años al agruparse los primeros cratones del eón y la rápida formación de una nueva corteza continental. Abarcaba lo que mucho más tarde serían los continentes de Laurentia (el corazón de las actuales Norteamérica y Groenlandia), Báltica (los actuales países bálticos y Escandinavia), Australia occidental y el Kalahari.

Visto desde la perspectiva, parece como si en estos 1.300 millones de años que duró el Arcaico, la geología iba experimentando, tanteando despacio, pasando de un mundo poco definido y muy dinámico a un mundo más estable, base para lo que vendría

después, en la era Proterozoica, que es cuando ya toman cuerpo los grandes cratones continentales.

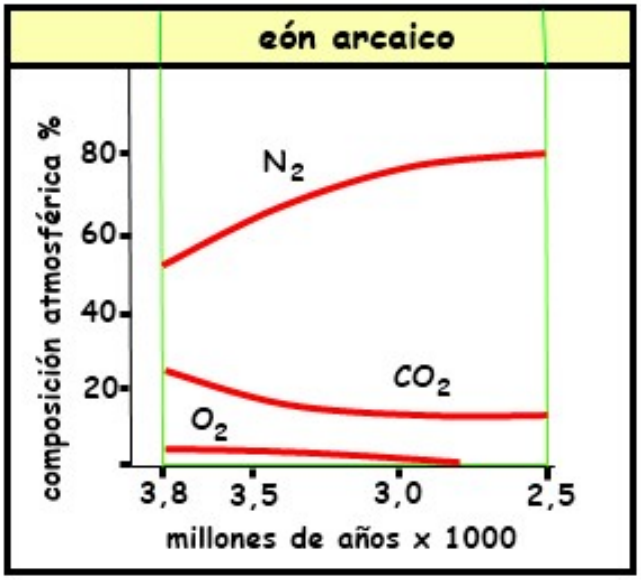
Muy semejante fue lo que pasó en la **biosfera**: el Arcaico constituyó una época de invención y consolidación, a nivel muy elemental, que abría puertas para su posterior desarrollo durante el eón posterior. La temperatura de los océanos debía ayudar. La presencia de cristales de yeso y bacterias fijadoras de nitrógeno encontradas en las rocas arcaicas demuestran que las temperaturas debieron de oscilar en un intervalo comprendido entre los 30º a 40ºC. En estas cálidas aguas proliferaban seres vivos sumamente simples con variadas estructuras, agrupados en los dos dominios que aún reconocemos, bacterias y arqueas, que desarrollaban un abanico muy amplio de soluciones metabólicas, obteniendo la energía necesaria a partir de formas variadas e insospechadas: nada fue imposible para ellas. *Podemos considerar que la variedad del Arcaico sorprende más por su diversidad metabólica que por la morfológica.*

Se cree que la atmósfera, que durante el eón Hadeico estuvo compuesta por el CO_2 primigenio y gases reducidos como el agua, amoniaco y metano, se había ido transformando poco a poco, de forma que hace 3.900 millones de años se tiene la certeza, dado el grado de oxidación de las rocas de aquella época, de que había cambiado por completo. En las emanaciones volcánicas abundaría el CO_2 y el agua.

En la atmósfera el antiguo amoniaco había sido disociado por la radiación ultravioleta convirtiéndolo en nitrógeno molecular, N_2, mientras que el metano, CH_4, se iba transmutando en CO_2 según el proceso que comentamos en breve.

A pesar de lo anterior, la concentración del dióxido de carbono no creció, al contrario, iba perdiendo su presencia posiblemente por el efecto de varias circunstancias. La primera sería que al irse enfriando la tierra y los mares, su disolución en las aguas podía ser mayor. La segunda es que se supone que la fotosíntesis

anoxigénica -de la que hablaremos en otro capítulo-, gran demandante y consumidor de CO_2, era ya un invento operativo desde hace posiblemente 3.500 millones de años. Una tercera circunstancia se producía seguramente desde hacía mucho tiempo como consecuencia de la reacción del agua y el propio dióxido de carbono en la atmósfera, por la que se produciría una disolución de ácido carbónico, CO_3H_2, en las gotas de agua. Al llover, este medio ácido disolvería los silicatos de los cratones transformándolos en sales del tipo carbonato que fueron arrastradas hasta el mar, formando allí grandes capas sedimentarias en donde quedó secuestrando gran parte del CO_2 atmosférico. Bien pudo ser esto último lo que diferencia ahora mismo a la Tierra de su hermana Venus, con una atmósfera de CO_2 que genera un efecto invernadero de altas temperaturas que la hace inhabitable.



Evolución de algunos gases atmosféricos durante el Arcaico

En aquellos momentos el agua de la superficie del mar se veía bombardeada por los abundantes rayos ultravioletas, lo que producía la rotura de su molécula. El ligero hidrógeno resultante se escaparía de la atracción gravitatoria hacia el espacio. El oxígeno producido en esta hidrólisis y el generado por las bacterias fotosintéticas pasó a la atmósfera, aumentando su presencia. A pesar de ello, *en los primeros momentos del proceso no se apreció un incremento importante en la concentración de este gas,* ya que

era “secuestrado” a partir de procesos químicos naturales, como eran las ya comentadas oxidaciones del hierro -que en aquellos momentos era muy abundante en los silicatos en su forma de ión ferroso-, o a través de la fotólisis del metano que por acción de la radiación ultravioleta se iba transformaba en CO_2 y agua, o bien pasaría a formar una capa de ozono que protegería a los organismos vivos de los efectos perjudiciales de dichas radiaciones solares. Otra gran cantidad lo usarían las propias bacterias para su metabolismo y otra parte se disolvería en el agua del mar.

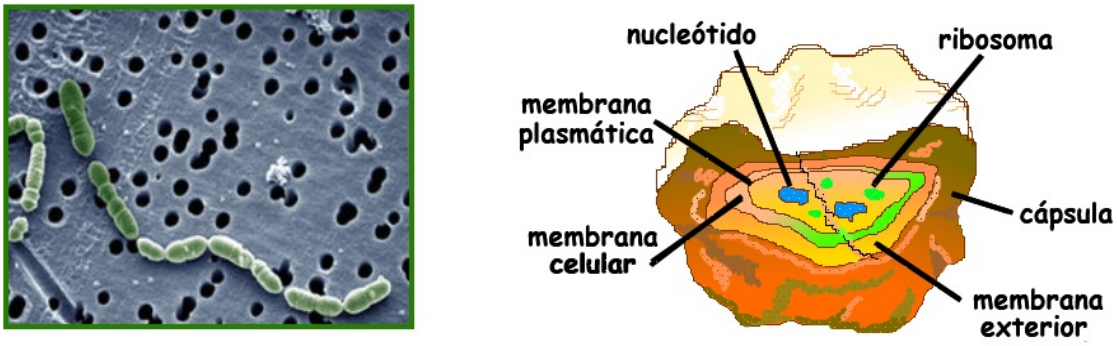
Poco a poco el oxígeno fue levantando cabeza a medida que se iban saturando los nichos en donde era atrapado, quedando oxidado todo lo susceptible de ser oxidado, de forma que hace 2.400 millones de años concluyó el proceso conocido como la **gran oxidación**, también denominado como **crisis del oxígeno**, un gran cambio medioambiental con el que se cierra el eón Arcaico. Tuvo que esperar unos 400 millones de años para que la participación del oxígeno en la composición de los gases atmosféricos se hiciera relativamente significativa.

La evolución de la composición de estos gases nos permite imaginar cómo serían las temperaturas. A principios del Arcaico, con grandes concentraciones de agua y metano, gases ambos de potente efecto invernadero, la temperatura sería cálida. Al disminuir la participación atmosférica de ambos gases, así como la del CO_2, hay que suponer que a medida que avanzaba el Arcaico la temperatura se fuera enfriando, aunque a lo largo de todo este eón aún no hay evidencias de ninguna glaciación. Pero esto era algo que iba a caer por su propio peso: la primera época de hielos se produjo prácticamente en la frontera del Arcaico con el Proterozoico, la glaciación Huroniana entre 2.400 y 2.100 millones de años antes de hoy.

Dibujado el escenario de estos 1.300 millones de años podemos pasar a ver qué ocurrió en la biosfera, cómo se manejaron aquellas pequeñas células que habían escapado de los venteos hidrotermales submarinos. Recordemos cómo en aquellos lugares la química

funcionaba espontáneamente, empujada por la termodinámica. Unas sencillas moléculas se fueron haciendo más y más complejas, llegando al laborioso y multivalente ARN el cual se hizo "luz de gas" a sí mismo al "parir" una molécula que se replicaba mejor que él, el ADN, y otra molécula que metabolizaba mejor que él, la proteína. Y pasó a un segundo e importantísimo término. Recordemos cómo esos pequeños "personajes" se protegieron dentro de una burbuja de doble capa lipídica y se lanzaron a colonizar los mares.

Creo que llegó el momento de presentarlas en sociedad: **las bacterias**, con sus dos dominios familiares de las eubacterias y arqueobacterias. Hace 3.800 millones de años, cuando comenzó el Arcaico, allí debían de estar, con la más simple de las estructuras**.**



Colonia de bacterias Oenococcus (Wikimedia, dominio público) y un corte de la estructura celular de una bacteria tipo.

Aunque la figura anterior de *Oenococcus* corresponde a bacterias actuales, las primitivas debían ser muy parecidas, con sus membranas protectoras en donde se generaban las pilas de energía en forma de adenosín trifosfato (ATP), su material genético arrollado formando los nucleótidos y los ribosomas como centros de producción de proteínas.

Unas encontraron sus garbanzos consumiendo compuestos de azufre, otras desgranaban la glucosa en ausencia de oxígeno, otras aprendieron a obtener la energía de la luz y otras a base de sintetizar metano. Habían conquistado variadas formas de sobrevivir, aunque todas compartían las mismas necesidades básicas. Todas ellas necesitaban una gran cantidad de carbono,

oxígeno e hidrógeno, y otros elementos como nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, magnesio, sodio, cloro… Todas necesitaban ensamblarlos formando moléculas funcionales para que sus máquinas no se pararan. Todas precisaban de energía externa y de un proceso como la quimioósmosis por la que la empaquetaba en forma de ATP. Habían también descubierto la forma de multiplicarse siguiendo rutas comunes. Al igual que cualquier ser vivo actual. No hemos cambiado demasiado.

Buscando una posible explicación de esta universalidad del metabolismo nos encontramos de nuevo con la ya conocida teoría de flujos de energía de Morowitz y Smith de la que ya hablamos en el capítulo 03 "*La química se apunta a lo bio*". Como ya sabemos, la teoría postula que la Vida **apareció espontáneamente** en un contexto geoquímico de estrés energético, al igual que un rayo surge espontáneamente en una situación de estrés de cargas electromagnéticas entre la tierra y las nubes. Todo habría sido un encadenamiento de hechos causa-efecto a través de estados termodinámicos, los más estables posibles, cada vez con un mayor orden interno gracias a un mayor y más eficiente consumo energético. Este determinismo del suceso explicaría el porqué de que el núcleo de los procesos metabólicos haya sido tan estable a lo largo de los años.

De esta causalidad resultante de equilibrios energéticos progresivamente más ordenados derivaría, por un lado, el hecho de que el inicio del camino de la Vida fuera único, y por otro el que el proceso siga y que además siga sujeto a un continuo desarrollo sin irreversibilidad posible. Posiblemente en un inicio los cambios fueron muy rápidos, bruscos y elementales, completándose posteriormente de forma más lenta con diversos refinamientos metabólicos.

Según la teoría de Morowitz la Vida sería, por tanto, un mero resultado de una inevitable aglomeración de actores, procesos y funciones, hasta cierto punto autónomos, que han ido surgiendo paulatinamente y que siguen siendo los mismos hoy en día. Una

fría y maquinal consecuencia de las energías geoquímicas y solar, más que una innovación gestada por la biología. Según esto, primero habría sido el metabolismo con su química y luego, gracias a que éste había generado las posibilidades precisas para ello, a su alrededor se habrían formado las estructuras.

Si esto es cierto, la consolidación del metabolismo como conjunto de reacciones bioquímicas y procesos físico-químicos bases para la Vida debió ser anterior al hecho de que la replicación fuera un coordinado proceso macromolecular. Primero las enzimas y después los genes.

Usando palabras de Morowitz "*el metabolismo básico no ha cambiado en los últimos cuatro mil millones de años y se ha mantenido vivo en las bacterias que se reproducen cada 20 minutos. Este mecanismo tan fuertemente conservado podría ser el único camino, lo que significa que se podría encontrar en todas las partes del universo donde haya vida. Podríamos ir a Marte y encontrar el mismo metabolismo intermediador. Se podría incluso decir que la vida se formaría en cualquier planeta que tuviera la química, la temperatura y la fuerza de gravedad adecuadas*".

De todas formas, una vez más, hemos de decir que ésta es una de las múltiples teorías sobre el inicio del metabolismo. Sabemos que hay otras, como la de Martin y Rusell que vimos en el capítulo 05, "*La casa natal de la Vida*", que postulan que todo fue el resultado del juego evolutivo de moléculas, más o menos complejas, en entornos favorables para ello y siguiendo exclusivamente las leyes de la química y la termodinámica.

Sea cual haya sido el camino, lo que sí es comprobable es el resultado, los diversos caminos metabólicos que seleccionó la Vida. En el próximo capítulo comenzaremos a profundizar en el tema: veremos quiénes son y cómo actúan las moléculas que gestionan la energía en las células. El primer paso para conocer el común código universal del metabolismo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 06:

1. Los **cratones** son los protocontinentes a partir de los cuales se formaron los primeros continentes por crecimiento en sus márgenes subductivos y por la intrusión magmática. Por ello los cratones se encuentran frecuentemente en los centros/núcleos de los continentes actuales y están típicamente rodeados de los cinturones de cordilleras montañosas más modernos.
2. Como éste publicado por la revista Nature de marzo de 2009. "*Primary haematite formation in an oxygenated sea 3.46 billion years ago*", Machamishi Hoashi et al.

07. Rudimentos de gestión energética

En el capítulo anterior hablábamos sobre el escenario del nuevo eón, el Arcaico, y de cómo en este escenario comenzaban su andadura unos organismos ya perfectamente estructurados y que aún dominan el mundo actual: las bacterias. En este capítulo comenzamos a desmadejar el código común de conducta metabólica que inventaron aquellos diminutos seres, y que comparten ballenas, secuoyas y levaduras.

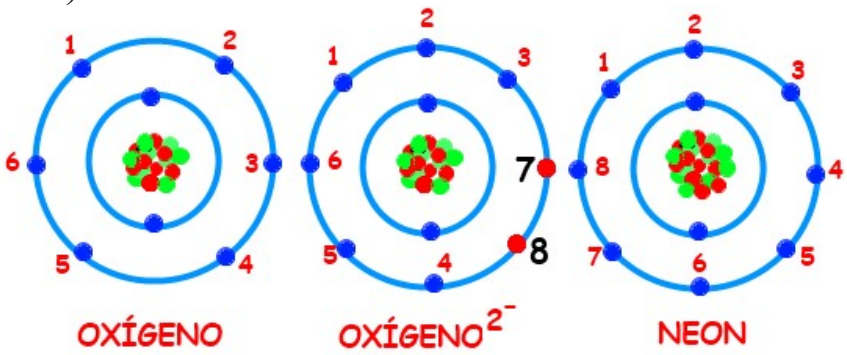
Para empezar a andar nos preguntaremos: ¿cómo es este manual de conducta universal?

Planteada esta cuestión merece la pena hacer una aproximación teórica a lo que son los procesos metabólicos, con la intención no sólo de disfrutar del conocimiento, sino también de admirarse con la compleja sabiduría de la naturaleza. En su desarrollo, más que una serie cronológica, despiezaremos los eslabones del proceso químico. Todo ello seguramente nos llevará más de un capítulo en este libro.

En el inicio del camino metabólico se colocan aquellos seres que recogen sus necesidades, básicamente CO_2 y H_2, directamente del mundo inorgánico, son los autosuficientes; llamamos a estos seres *autótrofos*. No les quedó más remedio, ya que no había nada más que la química exterior de donde aprovisionarse. Todos ellos llevan en el bolsillo una guía metabólica cuyo núcleo está constituido por unas 500 pequeñas moléculas (en fin… relativamente pequeñas… todo lo pequeño que se pueda ser con 200 protones organizados), las mismas en todos ellos. **Necesitaban energía**, y la encontraron en la sencilla química de las reacciones de oxidación y reducción: las *reacciones redox* indisolublemente unidas, ya que si hay una oxidación es porque a la vez se ha dado una reducción, y viceversa. Para imaginar mejor las bases de los procesos metabólicos que

manejan la energía, nos pararemos un poco en la explicación de este tipo de reacciones.

El motor de la Vida se encuentra en la energía de los electrones, en cómo se mueven. Hay elementos químicos que están hambrientos de ellos, mientras que otros prefieren perderlos de vista. Todo depende de qué es lo que tienen que hacer para que su configuración química se asemeje a la de un estable gas noble: o quieren electrones, como el oxígeno que está a dos pasos del neón, o quieren deshacerse de ellos, como el litio, que con un paso atrás se iguala al helio. No es que se transmuten en un gas noble, tan sólo lo hace su configuración electrónica pasando a ser iones positivos o negativos. En los ejemplos anteriores O^{2-} y Li^{+}. No os horroricéis los físicos, pero no me puedo resistir a plantear una sencilla regla nemotécnica que refleja los dos procesos: como el oxígeno ha "reducido" la carga eléctrica -ahora es más negativa-, diremos que se ha *reducido* mientras que el litio diremos que se ha *oxidado*, aprovechando la fama real que tiene el oxígeno de acaparar electrones (en este caso bien pudo aprovechar de dos átomos de litio para formar el Li_2O). Esto nos da una pincelada con la que entendemos mejor lo que queríamos decir en el capítulo primero, "*Hadeico*", cuando hablábamos de la atmósfera terrestre reductora, con CH_4, NH_3, SH_2 y H_2O (el hidrógeno regalando su electrón) o de la oxidante, con CO_2, O_2, SO_2 y H_2O (el oxígeno chupándolos).



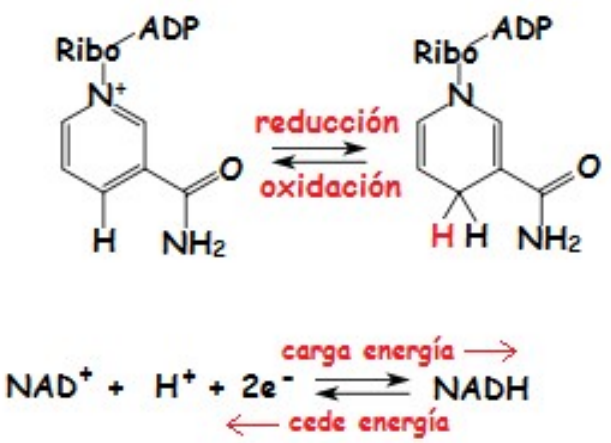
El oxígeno toma dos electrones para asemejarse al neón

Dicho todo lo anterior nos hemos de quedar con la idea fundamental de que *los electrones son los motores energéticos,* y

por tanto sabemos que quien los obtenga, reduciéndose, se habrá cargado de energía. En cambio, el que se oxida la ha liberado. Está claro que el juego de la energía está en el alma de las reacciones redox.

Dicho lo anterior, volvemos a nuestros primitivos autótrofos. Realmente fueron pertinaces en la búsqueda de energía. La encontraron por doquier, unos la vieron en los enlaces químicos de algunas moléculas inorgánicas y otros en la posibilidad de aprovechar la energía de las ondas luminosas. Pero, ¿cómo arrancarla de sus portadores? Y dado que los procesos de alimentación y de metabolización no son coincidentes en el tiempo, ¿cómo almacenarla para cuando hiciera falta?

La solución no llegó de repente, sino a través de sucesivos pasos pastoreados por la presión del medio, que evolucionaron hacia el mecanismo compartido por casi todos: la **cadena de transporte de electrones**, con la traca final de la quimioósmosis. Estos electrones se consiguen de unos compuestos muy simples llamados *moléculas reducidas*. Sorprendentemente el papel director de este proceso lo asumieron casi desde el principio las membranas lipídicas, las mismas a las que "simplemente" se les había pedido que aislasen el citoplasma celular.



El laborioso NADH

Antes de comenzar el viaje por los entresijos energéticos de las células presentaré otras actrices superimportantes del metabolismo

energético, que son las humildes currantes de todos estos procesos: las parejas de coenzimas (a la derecha su forma reducida) NAD/NADH, NADP/NADPH y FAD/$FADH_2$. Con sus interminables reacciones de reducción-oxidación se constituyen en transportistas de electrones mediante un incesante ciclo de "tomo un electrón, me lo llevo, lo suelto y vuelvo a por otro". Todos actúan más o menos igual.

Cadena de transporte de electrones

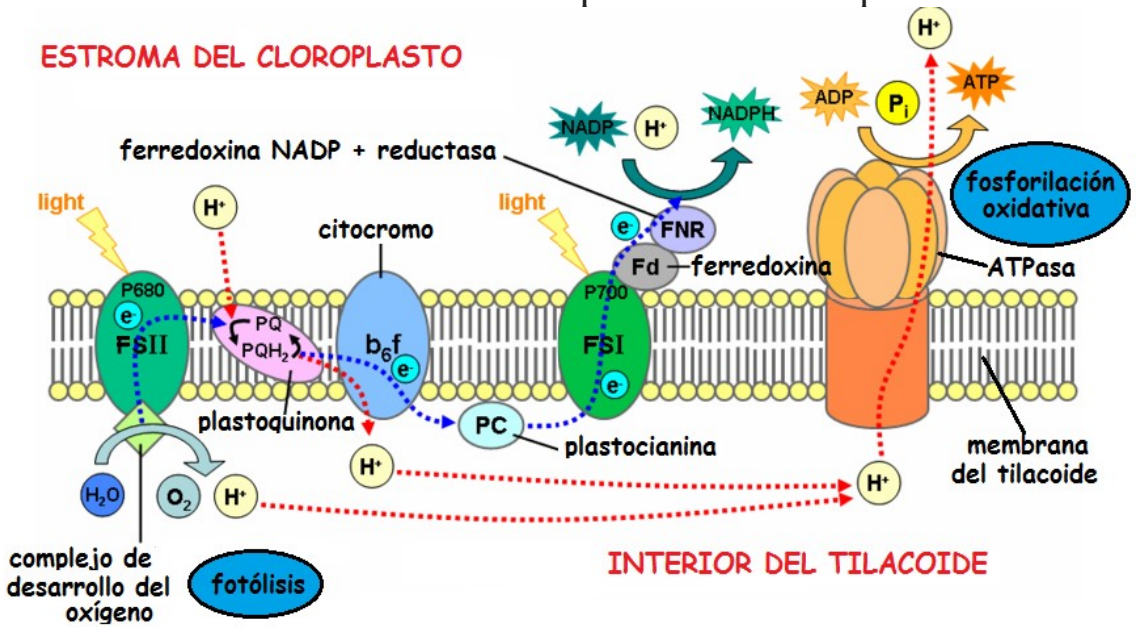
Pero ataquemos ya eso de la *cadena de transporte de electrones*. Todo empezó por conseguir electrones libres que se necesitaban para que el CO_2 fijara protones (H^+) y se transformara en azúcares. Esto se logra oxidando compuestos sencillos -los que más arriba habíamos llamado *moléculas reducidas*- que rompen alguno de sus enlaces, cediendo un electrón portador de la energía del mismo. Estas moléculas pueden ser muy variadas, tanto inorgánicas como el agua, el ácido sulfhídrico H_2S o el ión ferroso Fe^{2+} de la pirita, u orgánicas como la glucosa o aminoácidos. En estos casos en el proceso se obtiene energía puramente química, y por eso se le conoce como **quimiosíntesis**. Los organismos que optan por esta vía se les conoce como *quimiótrofos*: *litótrofos* si la energía la obtienen de moléculas inorgánicas y *organótrofos* si proviene de orgánicas.

Pero también se puede conseguir energía a partir de la luz, cuyos fotones excitan a una molécula de clorofila de forma que *algunos de sus electrones* saltan a un nivel energético superior. Estos electrones pasan progresivamente a otras moléculas a través de una cadena de transmisión, cediendo durante el recorrido parte de su energía.

A este proceso alternativo se le conoce como **fotosíntesis**, también con sus variantes litótrofas u organótrofas, y a los organismos que la practican *fotótrofos*. Muy al principio del invento, la clorofila reponía los electrones que iniciaban el flujo tomándolos de moléculas reducidas como el SH_2 o de compuestos del hierro que

dejaba oxidados. Pero la evolución la llevó hacia un proceso más eficiente: los compuestos químicos primeros dadores de electrones fueron sustituidos por el agua (a fin de cuentas oxígeno reducido, OH_2), liberando en el proceso una molécula de oxígeno y dos e^-. Se había pasado de la fotosíntesis anoxigénica a la oxigénica, de dejar como residuo el azufre a que fuera el oxígeno el residuo.

En la figura siguiente se puede ver el proceso de la fotosíntesis, siendo la línea de trazos azules la conductora de la cadena de transporte de electrones. Todo sucede en la membrana del cloroplasto, el tilacoide. Se diferencian el camino de los electrones (en azul) hacia el NADPH que ayudará a fijar el CO_2 y luego el camino de los H^+ (en rojo) que ayudará a embalsar energía en forma de ATP. Profundicemos un poco más en lo que nos muestra.

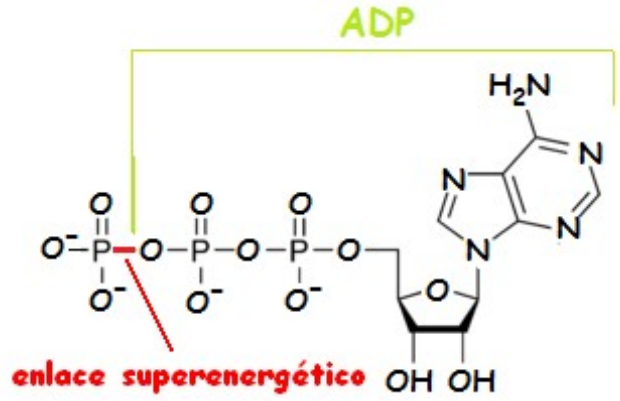


Cadena de transporte de electrones en la fotosíntesis (Wikipedia, dominio público)

Hemos conseguido lo que buscábamos: electrones libres y vigorosos a los que les vamos a arrancar su energía. Y como sucede en la cadena de comercialización de cualquier producto, donde el valor de los bienes se lo van repartiendo los distintos intermediarios, aquí pasa lo mismo: estos electrones van pasando de mano en mano, cediendo parte de su energía de molécula en

molécula, hasta un último receptor que se reduce químicamente y se queda con el último y más débil electrón.

Un *primer resultado*, el más evidente, es que aparece un subproducto de las primeras rupturas. En el caso de la quimiosíntesis, si partió de la rotura del sulfhídrico (SH_2), es el mismo S_2, y si es en la fotosíntesis oxigénica, que partió de la descomposición del agua mediante su fotólisis -rotura de la molécula por acción de la luz-, fenómeno por el que se produce su rotura en $2H^+$ y $1/2O_2$, se obtiene O_2 libre. Como ya hemos insinuado un poco antes, la modalidad en la que interviene el oxígeno es la más eficiente desde el punto de vista energético, ya que este elemento es, después del flúor, el que tiene el mayor poder oxidante de la tabla periódica. En una *segunda instancia* el último electrón de la cadena se lo queda una molécula ya conocida, una NADP que se lo guarda en su mochila para cedérselo en algún momento del proceso metabólico a un CO_2, que con la participación de algún H^+ se transformará más tarde, durante el rodar del ciclo de Calvin -del que hablaremos unos párrafos más abajo-, en un azúcar.



Fórmula del Adenosin TriFosfato, ATP. No nos debe sorprender su universalidad como moneda de cambio energética ya que, si lo observamos, su estructura monofosfatada es uno de los nucleótidos que conforman el ARN, nuestro viejo personaje del mundo del ARN (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 umported)

Un *tercer producto* es el ATP, ya que resulta que cada intermediario no sólo recibe y pasa electrones, sino que en cada

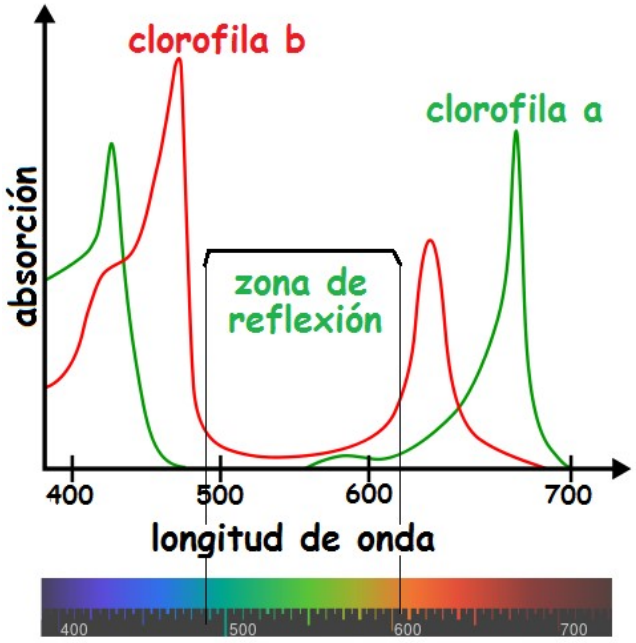
intercambio fuerza el paso de protones (es decir, iones H^+) del exterior de alguna membrana del cloroplasto a su interior, produciendo un desequilibrio iónico… ¿nos suena de lo que había en el entorno de los venteos alcalinos submarinos?

Este desequilibrio iónico no es sólo un tema poblacional, sino que su efecto más especial es que supone un desequilibrio de cargas eléctricas a ambos lados de la membrana con un valor de unos 150 milivoltios. No parece una gran diferencia de potencial eléctrico, pero hay que tener en cuenta que esta pequeña diferencia se produce entre un lado y otro de una membrana de tan sólo 5 millonésimas de milímetro, es decir la intensidad del campo eléctrico entre ambos lados es de unos 30 millones de voltios por metro, casi del orden de la de un rayo. Esto supone mucha energía embalsada y disponible y se la conoce como la fuerza protón motriz. Veamos cómo se aprovecha.

Una proteína específica, que se halla embebida en la membrana separadora -la ATPasa-, permite el paso de los protones en sentido inverso, restableciendo el equilibrio iónico inicial, en un proceso llamado **quimioósmosis**. En el bombeo a contracorriente de la proteína se van fabricando moléculas de ATP, que como hemos dicho son las baterías de cualquier organismo vivo: en el ATP el enlace del ADP (adenosín **DI**fosfato) con el tercer fósforo es superenergético. El sistema es bastante "inteligente", ya que así se consigue tener acumulada **toda** la energía conseguida del exterior, que se va a ir utilizando según necesidades, al igual que en una central hidráulica donde se acumula agua y se suelta según la demanda de energía eléctrica. Si no hubiera este embalsamiento intermedio en forma de ATP los procesos energéticos no serían tan eficientes, perdiéndose en calor mucha de la energía que procesamos desde los alimentos.

En el caso del proceso de la fotosíntesis participan de forma secuencial dos moléculas de clorofila, ligeramente diferentes. Del trabajo de la primera, la **clorofila b** situada en la trampa para la luz llamada FotoSistema II, salen como subproducto protones H^+, que

se utilizarán para formar ATP, y del trabajo de la segunda, la **clorofila a** del FotoSistema I, sale el NADPH que ayudará en los procesos metabólicos del organismo a capturar CO_2 de forma que se produzca "alimento". Menciono esta diferenciación, que se puede ver en la figura siguiente, ya que es necesaria conocerla para entender el proceso evolutivo que llevó a las bacterias hacia la fotosíntesis dominada por las cianobacterias.



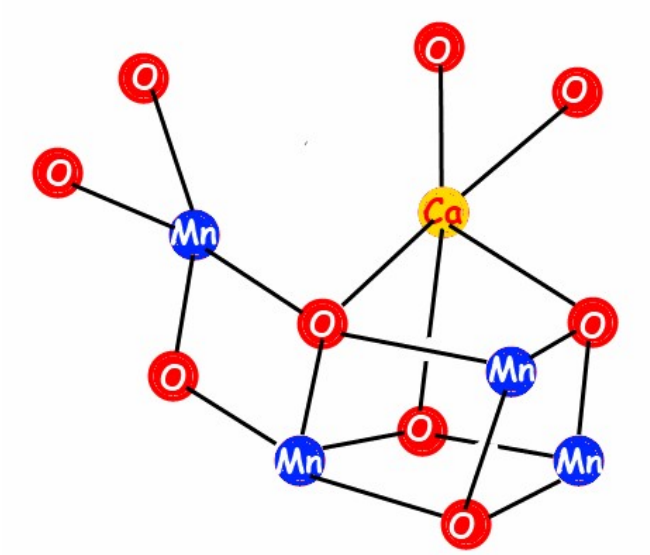
Curva de absorción de la luz de las clorofilas a y b, donde se puede observar que existe una zona de reflexión correspondiente a las frecuencias del verde (a partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Cada uno de estos Fotosistemas es sensible a una determinada longitud de onda de la luz solar. Uno en el entorno de la luz azul y el otro en la zona roja del espectro. Sin embargo, ambos reflejan la parte intermedia entre el azul y el rojo, que corresponde al color verde. Ésta es la razón por la que los organismos que tienen clorofila en sus células tienen color verde.

No se sabe muy bien como sucedió el invento de este complejo proceso, pero una teoría bastante aceptada ideada por el bioquímico John Allen de la universidad Queen Mary de Londres, postula lo siguiente:[1]

Inicialmente algunas bacterias aprendieron a usar la luz como fuente primaria de energía. Aliadas con una molécula que tenía en su interior átomos de manganeso, alguna clorofila rudimentaria, unas bacterias desarrollaron el camino de fijación del CO_2 semejante al que realiza el FotoSistema I, y otras el camino de empaquetamiento de energía en píldoras de ATP, como hace el FotoSistema II. Algún error de transcripción o alguna presión externa hizo que el gen que expresaba las clorofilas se duplicara dentro de una bacteria, por lo que se encontró con dos FotoSistemas.

Esta hipotética bacteria pionera debía vivir en un entorno que con toda seguridad experimentaba cambios a lo largo del ciclo anual: épocas de abundancia de materia prima sin ningún problema para alimentarse y épocas en las que escasearía. Durante el periodo de vacas gordas sintetizaría azúcares a partir del CO_2, y en la temporada de carestía sintetizaría ATP para el futuro. Poco a poco cada una de las dos clorofilas "hermanas" resultantes de la duplicación se fue especializando en una función diferente, lo que nos ha permitido llamarlas con el tiempo FS I y FS II. Pero ya que el metabolismo de las bacterias es muy limitado, hace sólo lo imprescindible ¡hay que usar la energía prudentemente!, por lo que no hacía funcionar a la vez a los dos FotoSistemas, sino de uno en uno según necesidades. La realidad es que en el mundo primitivo, donde todo esto sucedía, había una gran abundancia de manganeso y hierro, átomos que son fácilmente oxidables (en aquel momento la presión de la radiación ultravioleta aún debía ser importante) abandonando tras de sí unos electrones. El resultado es que el FS II se encontró en un ambiente muy rico en e^- que de alguna manera sobresaturaba su función y la bloqueaba. Alguna nueva casualidad hizo que progresivamente el FS I "recordara" su capacidad de trabajar como el FS II, y comenzó a usar los electrones para generar ATP, con lo que se descongestionó la bacteria. La coordinación resultó ser más eficiente que la descoordinación, lo cual supuso una ventaja para los que se coordinaban. La selección natural hizo el resto.



La molécula OEC -Oxygen Evolving Complex-, ***complejo de desarrollo del oxígeno****, encargada de la hidrólisis del agua durante la fotosíntesis*

El último paso, con el cual culminó la fotosíntesis oxigénica, se dio cuando el FS II encontró a una molécula especial hecha de oxígeno, calcio y manganeso, la molécula OEC -*Oxygen Evolving Complex*-, con una avidez total por los electrones, que era capaz de acompañar la fotólisis del agua y pasarle los e^- que aparecían a la molécula de clorofila FS II. Se quedaron las dos unidas y comenzó la fotosíntesis oxigénica.

¡Bueno! Fin de la ***fase Uno***. Ya tenemos *la energía empaquetada* a disposición de quien la necesite, y unos subproductos tan importantes como el O_2 molecular y libre, que en su momento fue el que rellenó la atmósfera terrestre.

Pero aún nos queda una ***fase Dos***, en la que *vamos a capturar materia* y la vamos a ensamblar forman polímeros básicos para nuestro metabolismo, aquellos que nos darán energía en forma de azúcares y grasas, formarán aminoácidos que construirán proteínas, fabricarán ácidos nucleicos y mantendrán las múltiples membranas celulares, tan importantes por su labor de contención física y de desequilibrios iónicos. O dicho en forma poética: ¡vamos a alimentarnos! La respuesta, en el próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 07:

1. "*Chapter 14 Origin of Oxygenic Photosynthesis from Anoxygenic Type I and Type II Reaction Centers*". Artículo original de John Allen (2014).

08. El metabolismo constructor

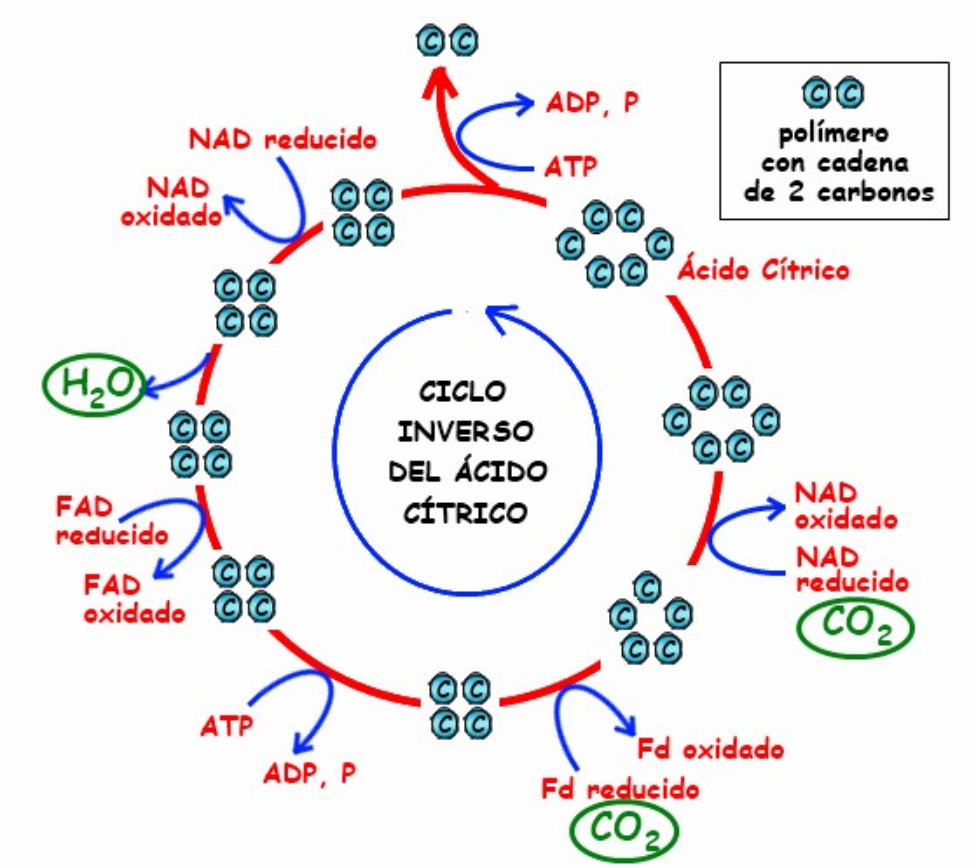
En los capítulos anteriores hemos hablado de que los seres vivos necesitan energía y materia prima para sobrevivir. La primera parte de esta pareja de necesidades quedó explicada en el capítulo anterior, en el que presentamos cómo los seres vivos son capaces de empaquetar energía externa para sus usos metabólicos. Hoy nos toca hablar de la otra cara de la moneda: el metabolismo.

El metabolismo nació cuando las proteínas entraron en escena asumiendo la función de catálisis que les cedió el ARN. Con las naturales mutaciones de los genes que las expresaban se iba incrementando el panel de proteínas disponibles. Las cuales irían colaborando unas con otras, iniciándose así un rudimentario metabolismo, que por el método de éxito-error se fue decantando hacia aquellas relaciones que fueran más eficientemente. Hasta consolidarse las rutas metabólicas que hoy conocemos.

Ya sabemos por capítulos anteriores cómo las primeras protobacterias prosperaron en medios con temperaturas casi de ebullición, con presiones inmensas y en chimeneas submarinas que escupían azufre, arraigadas en lo más primitivo y profundo del árbol de la Vida.

Hoy en día existen algunas bacterias de metabolismo muy simple y primitivo, que para construir sus organismos utilizan un ciclo anabólico que coincide en su base con el usado generalmente por la mayoría de los organismos para conseguir la energía y las biomoléculas que precisan. Lo más habitual es hacerlo a través del llamado ciclo de Krebs, del que hablaremos dentro de poco, aunque las primitivas bacterias de las que hablamos lo hacían girar al revés: es conocido como el **ciclo inverso del ácido cítrico**. Algunos científicos, como Harold J. Morowitz, piensan que una versión muy simplificada de este proceso pudo ser una opción metabólica posible en las condiciones prebióticas de la Tierra,

cuando se constituyó como un motor autónomo de la síntesis de todos los precursores bioquímicos: el ciclo inverso del ácido cítrico, en sus formatos más iniciales y sencillos, sería la hoja de ruta que utilizaban los primeros seres *autótrofos*, aquellos que se buscan la vida por ellos mismos y no necesitan de los demás, *para crear pequeñas biomoléculas a partir del CO_2 y el agua*.



La idea está fundamentada, ya que existen hoy en día ciertas bacterias como la termofílica y autotrófica *Aquifex-Hidrogenobacter,* uno de los linajes más antiguos de estos seres, que utilizan el ciclo inverso del ácido cítrico para sintetizar los polímeros orgánicos más esenciales a partir del CO_2. Y lo sorprendente es que este ciclo, y sus redes de polímeros secundarios, son autocatalíticos, de forma que sus subproductos incrementan la eficacia de su propia síntesis. Algo así pudo ser el principio del metabolismo.

Con posterioridad todo se hizo más complejo. El ciclo inverso del ácido cítrico tomó su giro habitual, dando lugar al **ciclo de Krebs**, y apareció una nueva rueda metabólica, el **ciclo de Calvin**. Ambos son sofisticados ciclos autocatalíticos formados por cadenas de moléculas orgánicas que se van dando la mano para volver al punto de partida. Vamos a analizar a ambos.

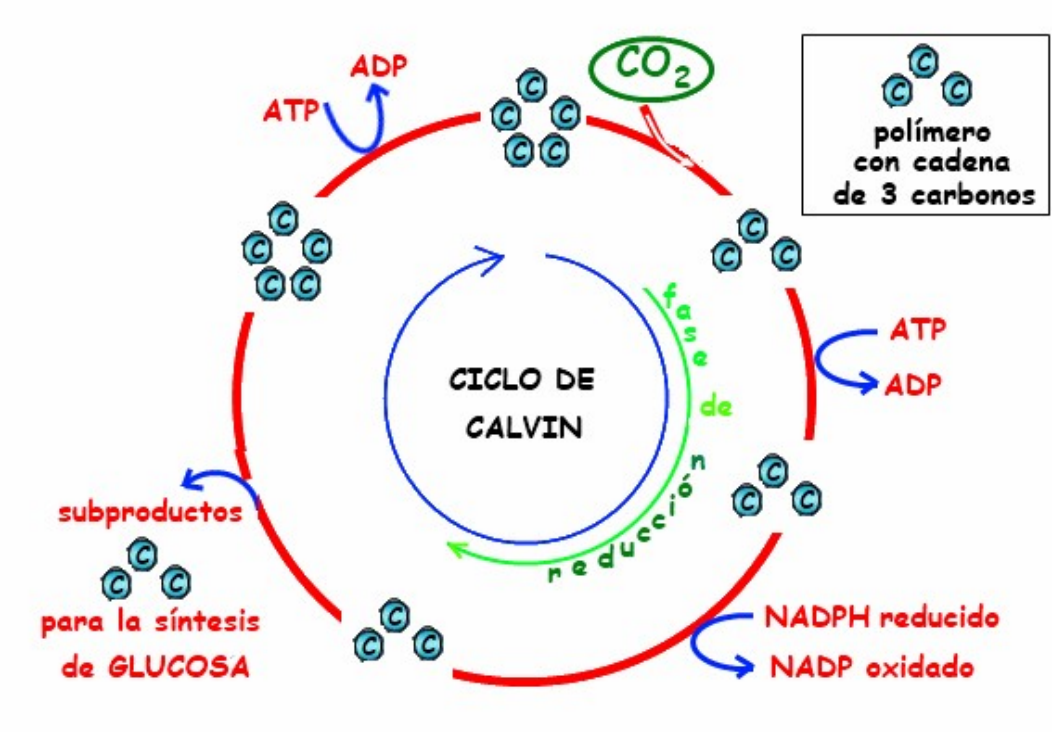
Comenzaremos con el ciclo de Calvin ya que es el complemento de la fotosíntesis**,** de la que aprovecha los ATP's y NADPH's que ha generado que, como sabemos, son unos fantásticos transportistas de energía. A partir de este ciclo, organismos como las plantas fijan el carbono y fabrican glucosa para sus reacciones metabólicas. Se trata también de un proceso *anabólico* por el que, mediante la adición de energía vía ATP y del poder oxireductor de las coenzimas, como el NADP, *se integran moléculas inorgánicas de dióxido de carbono (CO_2) y se convierten en moléculas orgánicas sencillas***,** a partir de las cuales se formará el resto de los compuestos bioquímicos que constituyen los seres vivos.

Éste es el proceso por el que consiguen energía y materiales de construcción **todos** los seres vivos *autótrofos,* ya sean *fotótrofos* -que obtienen la energía a partir de la de la luz, como las plantas- o *quimiótrofos* -que la obtienen a partir de la de los enlaces químicos, como algún tipo de bacterias-.

La ecuación resumen del catálogo de reacciones químicas que se producen a lo largo del ciclo de Calvin es la siguiente, donde **P** es el fósforo:

$$\mathbf{6CO_2 + 12NADPH + 18ATP <\!\!-\!\!> C_6H_{12}O_6 + 12NADP + 18ADP + 18P}$$

El dióxido de carbono se transforma en una preciada molécula de glucosa, $C_6H_{12}O_6$, mediante el "sacrificio" de nuestras conocidas moléculas energéticas NADPH. No importa, pues se recuperarán con creces durante los procesos catabólicos de la célula.



Ciclo de Calvin, mediante el que los organismos fotosintéticos fijan el dióxido de carbono y generan los precursores para la síntesis de glucosa

En la imagen anterior vemos cómo en el ciclo entra CO_2 en el momento procesal de la parte superior mientras que por la parte inferior sale una molécula de gliceraldéhido fosfato (GAP) de tres átomos de carbono, que será la base a partir de la cual se formen azúcares como la fructosa y la glucosa. También, a partir de estos azúcares, se formarán directa o indirectamente las cadenas de carbono que componen el resto de biomoléculas que constituyen los seres vivos (lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc). Hasta aquí la estrategia que siguen los organismos autótrofos.

Pero, ¿qué pasa con los seres *heterótrofos?* Llamamos heterótrofos a aquellos que no buscan energía ni construyen sus organismos con las sencillas moléculas de su entorno (dióxido de carbono, oxígeno o agua) sino que todo lo consiguen directamente mediante la ingesta de autótrofos vegetales o devorando a su vez a otros seres heterótrofos. ¿Qué hacen con la materia prima ingerida? ¿Qué estrategias deben adoptar en cada uno de los ambientes donde se

encuentre el atareado organismo? Ya sea en el fondo del mar, como en un principio, o más tarde en la cúspide de una montaña, ya sea en condiciones extremas o en el trópico, tanto se disponga de oxígeno como se viva en la más absoluta ausencia de esta molécula.

Los caminos de esta faceta metabólica a la fuerza tenían que ser variados. Y de hecho se encontraron soluciones para todos los gustos. Adaptadas al medio, aprovechando al máximo las posibilidades, unas más eficientes que otras. Vamos a comentar aquellas más generales y que cubren la mayor parte de lo que se conoce como **rutas metabólicas**.

Todas ellas suelen comenzar con la glucólisis, que es la "digestión" de la glucosa, con el objeto de conseguir energía. Tras un proceso de múltiples transformaciones moleculares se obtiene la tan buscada energía en forma de ATP. El resumen del proceso total lo recoge la ecuación siguiente:

$$\mathbf{Glucosa + 2\ NAD^+ + 2\ ADP + 2\ P_i \longrightarrow 2\ Piruvato + 2\ NADH + 2\ ATP + 2\ H^+ + 2\ H_2O}$$

Después de que la molécula de glucosa se haya transformado en dos moléculas de piruvato, que es un polímero con tres átomos de carbono, éste continúa su camino que dependerá de cuál sea el medio donde se encuentre el organismo metabolizador: la diferencia la da si hay o no hay oxígeno disponible.

Metabolismo aeróbico

En un mundo oxigenado, el piruvato se dirige hacia un nuevo ciclo metabólico que ya hemos mencionado con anterioridad, el ciclo de Krebs, para acabar con una cadena respiratoria de cesión de electrones muy parecida a la que ya explicamos en el capítulo anterior al hablar de la fotosíntesis, y que como receptor final de esos electrones se apoya en el oxígeno que pasa a formar agua. Al conjunto de estas rutas metabólicas se le conoce como **respiración celular**.

Centrémonos en la figura anterior. Los elementos de partida son los *glúcidos* (glucosa y otros azúcares), *grasas* y *aminoácidos*, los cuales van a ser despiezados en un molino circular. Los tres, tras seguir caminos diferentes, llegan a generar piruvato, que se degrada a Acetil-CoA para entrar en el ciclo de Krebs que, como el de Calvin, también genera precursores de muchas biomoléculas así como energía en forma de ATP y coenzimas con poder de reducción (FADH y NADH). En el camino deja un residuo de CO_2.

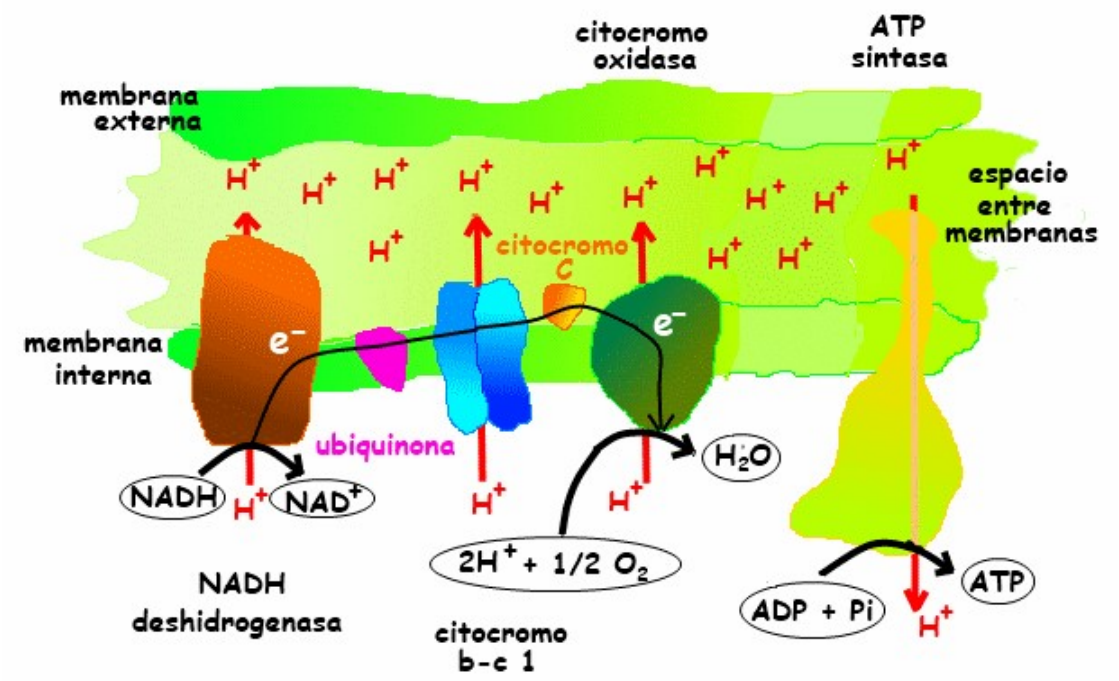


Caminos metabólicos del anabolismo y catabolismo del carbono. En su mayoría se corresponden a procesos de la respiración celular aeróbica.

Es un conjunto de procesos anabólicos –en los que se produce la biosíntesis de polímeros- y catabólicos -procesos en los que se rompen los polímeros y se almacena la energía química obtenida-. Así como el anabolismo es la herramienta inventada por los seres autótrofos, los heterótrofos añadieron reacciones catabólicas para complementar las **básicas, centrales y universales anabólicas**.

La cadena respiratoria

El último paso del proceso de respiración tiene lugar en las membranas de las mitocondrias, un orgánulo que es la auténtica central energética de las células y de las que hablaremos más tarde en algún capítulo dedicado al eón Proterozoico, cuando estemos siguiendo la pista de su aparición en la escena de la Vida.



Cadena respiratoria de electrones, proceso que se da en las membranas de las mitocondrias de las células y cuyo objetivo fundamental es el conseguir energéticas pilas de ATP.

Te recomiendo ver la figura de más arriba mientras lees la descripción de lo que ocurre. Se trata de aprovechar toda la capacidad energética de las coenzimas NADH y FADH que se habían generado durante el proceso de respiración aeróbica, para

iniciar una última cadena de transporte de electrones, cosa que consiguen al traspasar alguno de sus electrones al complejo enzimático NADH deshidrogenasa. Tras una alocada carrera a través de diversas enzimas en un proceso muy similar al explicado para la fotosíntesis, el electrón acaba en un **oxígeno que actúa como último receptor de e^-**. Al unirse a protones H^+ formará agua como residuo. En el proceso, aprovechando la energía de los electrones viajeros, se van pasando iones H^+ del interior de la mitocondria a la zona intermedia de su membrana. Y todo este tejemaneje, para conseguir lo que realmente es crucial para la célula, almacenar energía para su supervivencia en forma de moléculas de ATP. Esto lo consigue mediante el bombeo inverso de los iones H^+ a través del complejo enzimático ATP sintasa, en donde la energía cinética de los iones se usa para formar un ATP.

El resumen global de la respiración aeróbica lo expresa la siguiente ecuación:

$Glucosa\ (C_6H_{12}O_6) + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + energía\ (38\ ATP)$

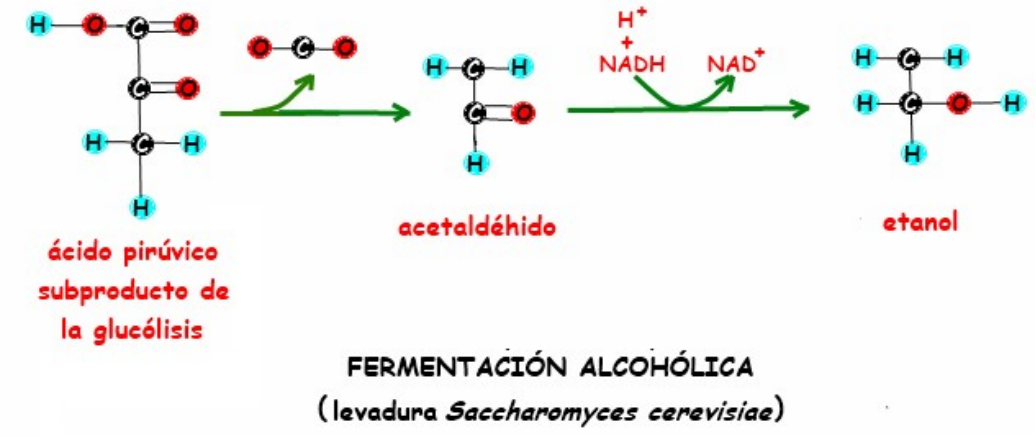
¡Realmente es un proceso generoso con la obtención de energía, como así lo indican los 38 ATP's libres que se han conseguido! Cada ATP liberará 7,3 kcal/mol en el preciso momento en que se necesiten.

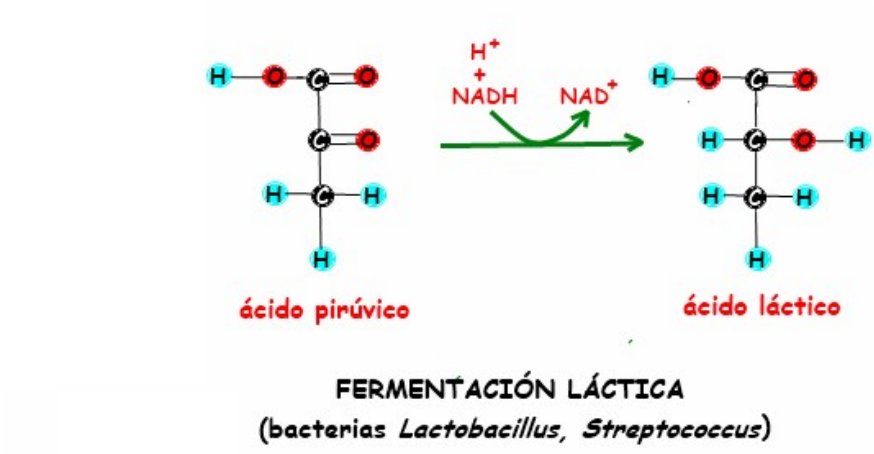
Metabolismo anaeróbico

Pero no siempre hay oxígeno disponible, como en el fondo legamoso de un pantano, en la tripa de una vaca, en un cubo de leche vieja o en el mosto fresco de la tinaja de una bodega. Vamos a ver qué pasa en estas circunstancias y de qué manera se manejan las sencillas bacterias y levaduras que viven y prosperan en estas condiciones.

Pueden llevar a cabo dos procedimientos que les permite almacenar energía utilizable, ambos con un inicio similar y un final distinto. Los dos procesos son la **respiración anaeróbica** y la **fermentación** ¿Quién no ha oído hablar de la fermentación

alcohólica que las levaduras producen en los azúcares de las uvas y que conducen al buen vino? ¿O de la fermentación láctica gestionada por bacterias como la *Lactococus* que da yogures y queso?





Algunos tipos de fermentación: la alcohólica (vino) y la láctea (queso, yogurt)

Comienzan con el asalto de la energía de la glucosa para obtener el piruvato, y de ahí por distintos caminos hasta el residuo final. Cuando hablamos de la respiración aeróbica decíamos que el baile de la cadena de transporte de electrones acababa siempre en un oxígeno, que se reducía al compás de unos iones de hidrógeno, produciendo en el envite una molécula de agua. Pues bien, tanto la respiración anaeróbica como la fermentación al **no disponer de oxígeno** como elemento último receptor de los electrones de los NADH producidos en la glucólisis, encuentran la misma prestación en compuestos inorgánicos, tales como sulfatos y nitratos, durante

la *respiración anaeróbica* utilizando para ello una cadena transportadora de electrones como las que conocemos, o en el caso de la *fermentación* a compuestos orgánicos, como el acetaldehído o el mismo piruvato, sin que medie cadena de transporte alguna.

De ahí la menor eficacia energética en estos procesos comparada con la que se obtiene mediante la respiración aeróbica: el salto energético hasta el oxígeno es mayor que el salto energético hasta los últimos receptores de estos procesos anaeróbicos. Por ejemplo, en la fermentación sólo se obtienen 2 moléculas de ATP frente a las 38 que se producen durante la respiración aeróbica. En estos mundos los saltos energéticos aprovechables son menores que en el caso de la respiración aeróbica. A pesar de que en los mundos sin oxígeno los saltos energéticos aprovechables son menores, esto no quiera decir que no sean eficaces. Y si no que se lo pregunten a las bacterias *Clostridium* que prosperan en la tripa de los animales obteniendo con sus metabolismos unos resultados un tanto pútridos y desagradables.

Y sin embargo, éste es uno de los hechos diferenciadores entre los organismos simples y los complejos.

Resumen metabólico

Después de conocer de forma somera las variadas estrategias que adoptan los seres vivos para su subsistencia, estamos en condiciones para proseguir por el sendero evolutivo de la Vida. El metabolismo nos puede parecer un aspecto que roza lo teórico dentro de la biosfera, pero ciertamente es una de sus bases y con él todo funciona. Por esta razón, permitidme que haga un último resumen que fije nuestros conocimientos antes de continuar con nuestra historia.

Los seres vivos necesitan materia prima y energía para construir sus organismos. El metabolismo dirige estas necesidades. Los procesos de “creación” constituyen el anabolismo, que utiliza la energía -producida durante el catabolismo- y moléculas sencillas, como el agua o el dióxido de carbono, para crear otras un poco más

complejas, como los azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y bases nitrogenadas, para posteriormente sintetizar los grandes polímeros que utilizan las células: polisacáridos, proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Los procesos de "destrucción" constituyen el catabolismo, que podemos asemejar como una productiva marcha atrás, ya que a través de ellos se generan las moléculas portadoras de energía de las que hemos hablado tanto, ATP, NADH o $FADH_2$, que se utilizarán durante el anabolismo, y se degradan las macromoléculas celulares hasta las más sencillas. Y volver a empezar a través de una enmarañada red de soluciones.



Esquema del proceder del metabolismo

Dentro de estos dos procesos generales también hemos visto como hay diversas variedades de plantear el metabolismo (a) según que los organismos sean autótrofos o heterótrofos; (b) según que la energía provenga de la luz -fotótrofos- o de los enlaces químicos de moléculas -quimiótrofos-; o (c) según que los electrones que inician esta energía se obtengan de moléculas orgánicas -organótrofos- o inorgánicas -litótrofos-. Y la verdad es que en la naturaleza vamos a encontrar modelos que empleen cualquier terna a-b-c. Como pudiera ser el metabolismo auto-foto-litótrofo de nuestras conocidas cianobacterias; o como el de los animales que son hetero-quimio-organótrofos.

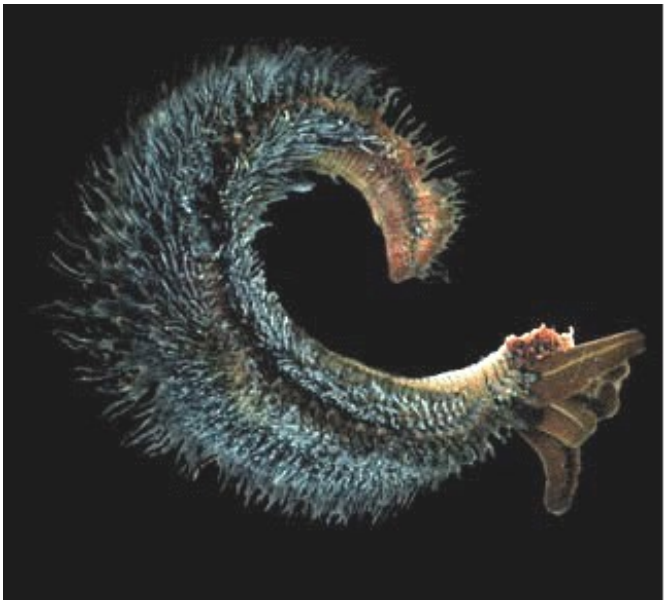
Ya sólo nos queda retornar a la senda y contemplar desde la lejanía cómo los seres vivos fueron conquistando los anteriores caminos

metabólicos. Cosa que veremos en el siguiente capítulo, a lo largo del cual caminaremos hasta fijarnos además en las primeras evidencias fósiles de unos seres que ya conocemos, las asombrosas bacterias, que diseccionaremos como el adecuado colofón de una época en donde ellas fueron las únicas reinas, el eón Proterozoico.

09. La vida en el Arcaico

Tras dos capítulos dedicados al metabolismo, en este recuperamos la cronología de los hechos tal como pudieron haber ocurrido a lo largo del eón Arcaico. Seguimos en las profundidades de la edad del planeta, de 3.800 a 2.500 millones de año antes de hoy.

La Vida estuvo presente durante todo el eón Arcaico, desde su inicio, pero es probable que estuviera limitada a bacterias y archaeas, organismos procariotas (células sin núcleo) con doble membrana celular. Intentemos hacer ahora su historia cronológica.



Alvinella pompejana un gusano de hoy en día que vive en las fuentes hidrotermales del océano Pacífico y que es capaz de soportar temperaturas de hasta 80ºC. Su espalda está recubierta de bacterias quimioautótrofas (Wikimedia, dominio público)

Por lo que hemos aprendido en los capítulos anteriores ya podemos imaginamos a los primeros organismos vivos, a los que aún no me atrevo a definir como bacterias, viviendo en las porosidades de estructuras submarinas, de la materia que surgía gracias a la energía redox de las paredes de pirita y de la especial química del

entorno, la cual había sintetizado, entre otras, moléculas orgánicas que permanecían disueltas en las aguas de las surgencias termales. Las aprovechaban para su desarrollo unos organismos que vivían de la caridad de la química practicando una obligada e incipiente heterotrofía y usando un sencillo metabolismo, posiblemente próximo a una fermentación.

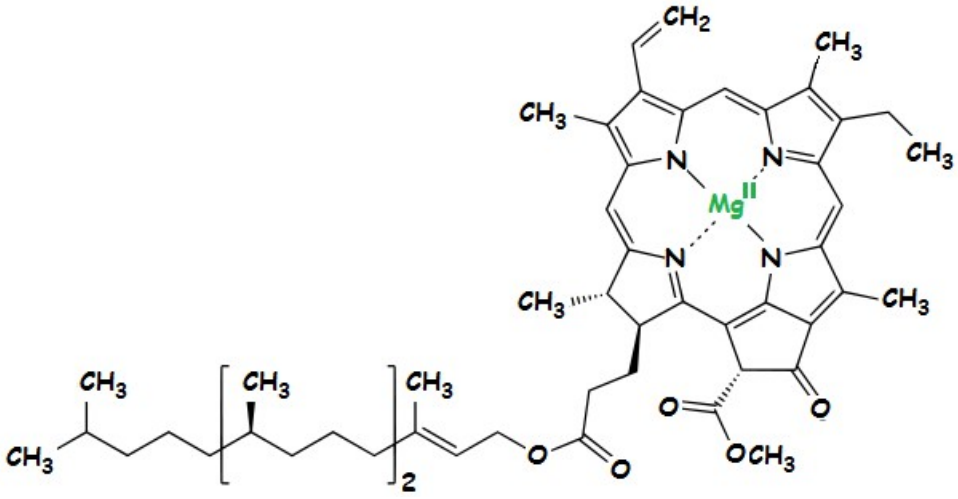
Lograron escapar de la cárcel de piedra. Las más ancestrales y elementales bacterias que habían salido de los venteos submarinos empezaron a colonizar los mares protegidas por sus membranas. Allí habían estado cuidadas por el entorno abrigado de los poros de las rocas, alejadas de los muy temibles rayos ultravioletas, y ahora, libres, debían obtener sus necesidades en un mundo sin oxígeno a partir de las moléculas de tipo orgánico que se habían ido formado a lo largo de millones de años de evolución química.

Con posterioridad, y a medida que disminuía la cantidad de compuestos orgánicos disponibles, gracias a alguna mutación aprendieron a ser autónomas. Su mundo era el submarino según unas teorías, o próximo a la superficie del océano, viviendo en el caldo primordial, según otras, en un momento en que la atmósfera era densa, lo que dificultaba el paso de la luz solar y su energía asociada. Debieron conseguir sus garbanzos a partir de reacciones químicas exotérmicas y fijando el carbono a través del CO_2 disuelto en las aguas. Las pioneras debieron ser por tanto protobacterias **autótrofas quimiosintéticas** y **anoxigénicas**, que obtendrían la energía vital a partir de variados procesos químicos catabólicos en los que participaban iones metálicos o derivados del azufre, y que aún no generaban oxígeno como subproducto ¿Algo así debió ser nuestro LUCA?

El anabolismo quimioautotrófico ha quedado hoy en día limitado a los más antiguos organismos, lo que refuerza la opinión de un inicio de la Vida con este tipo de seres con metabolismo autotrófico. Al lado de esta solución metabólica se observa el gran recorrido posterior de la naturaleza hacia una extensa variedad de soluciones que han dejado arrinconado al ancestral

quimioautotrofismo. Aunque no siempre, la evolución avanza normalmente añadiendo, más que quitando.

El incremento de la vida haría que los fondos marinos se fueran llenando de materia orgánica procedente de los infinitos organismos de bacterias muertas. Los ladrillos fundamentales estaban allí, precocinados, como quien dice, sin necesidad de acudir directamente al CO_2 y H_2O para fabricarlos. La oportunidad era muy grande y el salto en eficiencia también. Así que no es de extrañar que algunas bacterias aprovecharan esta nutricional "basura": se había rediseñado el **heterotrofismo**, ahora ya perfecto. No obstante, las formas de obtener la energía debían ser las ya conocidas, a partir de la de los enlaces químicos mediante un proceso de **fermentación** en aquel mundo sin oxígeno.



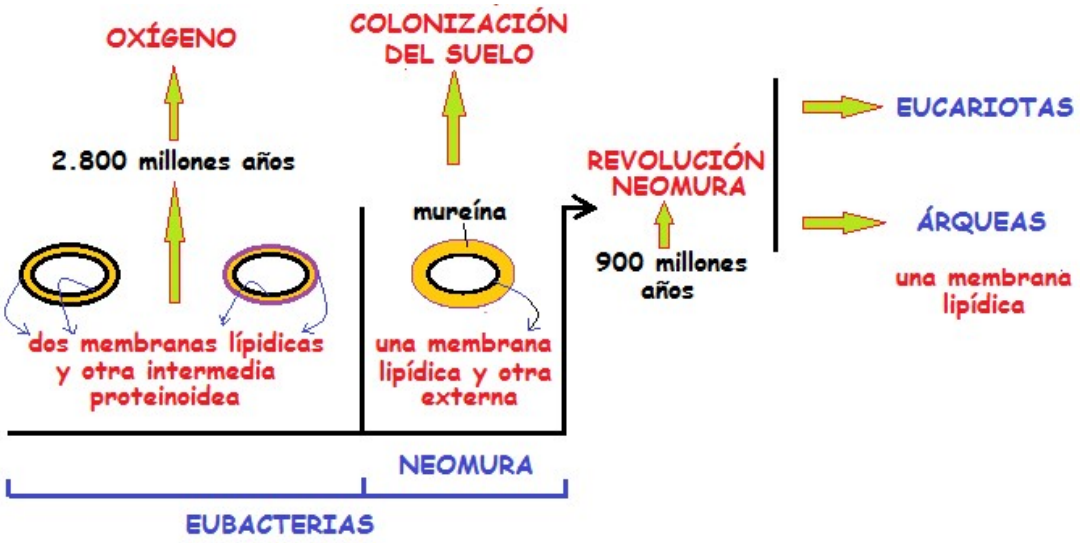
Molécula de la clorofila, cuya precursora, la porfirina, abrió el camino a la fotosíntesis (Wikimedia, dominio público)

Al irse aclarando la atmósfera e ir disponiendo progresivamente de más energía lumínica, algunos autótrofos se especializaron en utilizarla como fuente de energía con un mayor rendimiento, aunque sin apoyarse aún en el oxígeno. Bacterias similares a las púrpura y verdes del azufre, con sus dobles membranas fosfolipídicas rodeando a una tercera interior de tipo proteínico, habían descubierto la **fotosíntesis anoxigénica** mediante la incorporación en su ciclo metabólico de una nueva molécula inteligente, la *porfirina*. Esta molécula tiene una estructura

fundamental en forma de un anillo complejo de carbonos y nitrógenos, a la que inicialmente se le adosó en su posición central un átomo de magnesio. Posiblemente todo ello sucedió hace más de 3.500 millones de años. Podemos afirmarlo gracias al análisis de unos tapetes microbianos fósiles encontrados en el cinturón Barberton Greenstone sudafricano, datados en más de 3.300 millones de años, habiéndose llegado a la conclusión de que la fotosíntesis ya existía al menos en aquella época.

Después de este período de evolución anaeróbica en un mundo marino protegido de los rayos ultravioletas, se produjo lo que el zoólogo anglo-canadiense Tom Cavalier-Smith considera la primera gran revolución de las bacterias. La fotosíntesis evolucionó en el antepasado común de todas ellas hacia su forma oxigénica al colaborar con el agua para obtener energía, abriendo así el camino para olvidar los ineficientes metabolismos anaeróbicos y dando paso a la supereficiente respiración aeróbica. Desde el punto de vista de la Evolución con mayúsculas, la novedad presentaba demasiadas ventajas como para despreciarla. En el camino dejaban **un subproducto que revolucionó el mundo, el oxígeno**. Aunque sigue siendo objeto de muchos debates, los datos geológicos indican que este fundamental evento tuvo lugar en un momento temprano de la historia de la Tierra, hace al menos 2.450-2.320 millones de años. O posiblemente mucho antes, como lo afirma una publicación aparecida en 2015 [1] en la que se justifica un adelanto de la frontera inferior de este evento hasta hace unos 3.200 millones de años. Poco a poco los organismos heterótrofos se introducían en el mundo aeróbico**, la era de las cianobacterias**, un mundo lleno de amenazas, ya que el oxígeno era un veneno para las bacterias –es un elemento con gran reactividad que las oxidaba, robándoles valiosísimos electrones energéticos-, pero a la vez un mundo lleno de posibilidades, más eficiente y a la larga más energético, lo que permitió una vida más activa, un mejor posicionamiento frente a las oportunidades y amenazas del medio ambiente, unas reacciones vitales más rápidas, lo que a fin de cuentas permitió unas posibilidades de evolución hacia estructuras

más complejas e "inteligentes". *Casi a la vez se hacía más complicada la química en la membrana exterior de las bacterias*. Desaparecía la capa lipídica más exterior, mientras que la intermedia, que ahora quedaba en primera fila, se engrosaba al formar una intrincada red de un polímero llamado mureína, con lo que conseguían una gran resistencia estructural frente a las diferencias de concentraciones de proteínas entre el interior de la célula y el medio exterior. A este nuevo tipo de bacterias se le conoce como *neomuras*, que literalmente significa "pared nueva".



Revoluciones bacterianas según Cavalier-Smith. Una, la generación de oxígeno, y la segunda, la aparición de las neomuras

La gran controversia actual es si las neomuras como ancestros de las archaeas son muy antiguas, ancladas casi en los orígenes de la vida (como hemos afirmado en capítulos anteriores), o bien son más "modernas". La filogenia más actual parece que apuesta por esta segunda vía, que surge también de las teorías de Cavalier-Smith,[2] el cual opina que hace unos 900 millones de años las bacterias experimentaron su segunda gran revolución. El camino de las neomuras se ramificó en dos, el que llevaría a las archaeas y el propio de las eucariotas. Mientras las archaeas se adaptaron a ambientes calientes y ácidos, cambiando la proteína de su gruesa capa exterior, las eucariotas también adoptaron algunos cambios.

Pero ésta es otra historia que contaremos con posterioridad. Y que deberá encajar con la antigüedad de más o menos 2.000 millones de años de lo que parecen ser los fósiles más antiguos de eucariotas. Lo veremos en un capítulo posterior.

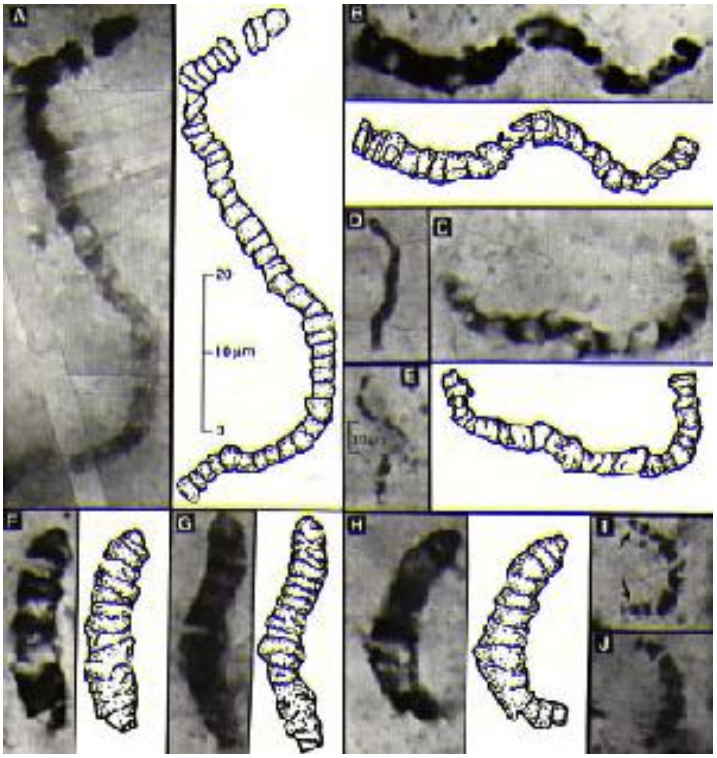
Sabemos que la crisis del oxígeno [3] tuvo su apogeo hace unos 2.400 millones de años, finalizando ya el eón Arcaico, con lo que culminaba el episodio de la gran oxidación. A partir de ahí el oxígeno de las cianobacterias quedó disponible para ser acumulado libremente en la biosfera. El porcentaje atmosférico de oxígeno, que hasta entonces se había contenido, comenzó su escalada. La Vida tuvo que reaccionar a esta amenaza, y realmente lo hizo con habilidad. Tuvo una ayuda colateral, ya que en las altas capas de la atmósfera la luz comenzó a catalizar una capa de ozono, O_3, al disociar los dos átomos que componen el gas de oxígeno O_2**.**

Esta capa protegió la superficie de los mares favoreciendo la extensión del plancton superficial y, a la postre, **la propagación de las bacterias**. Tuvo que ser por tanto poco después, posiblemente en la frontera con el Proterozoico, mientras despegaba lentamente el oxígeno en la atmósfera, cuando se conquistó un nuevo avance en la eficiencia, aprovechando que el oxígeno generado en la fotosíntesis podía ser usado para incrementar notablemente el rendimiento energético del metabolismo.

La **respiración aeróbica**, una de las más notables adaptaciones biológicas que sobre el planeta se ha dado, fue lo que permitió a los seres que la practicaron, unos 1.500 millones de años más tarde, iniciar una forma de vida más estable, compleja y especializada, como podemos apreciar en las actuales plantas y animales.

¿Fósiles?

Es casi imposible detectar fósiles de los seres arcaicos, dado que no disponían de partes duras. Sin embargo sí se puede saber de ellos a través de marcadores biológicos -compuestos químicos relacionados con sus procesos metabólicos- o mediante su influencia y las pistas dejadas en el medioambiente.

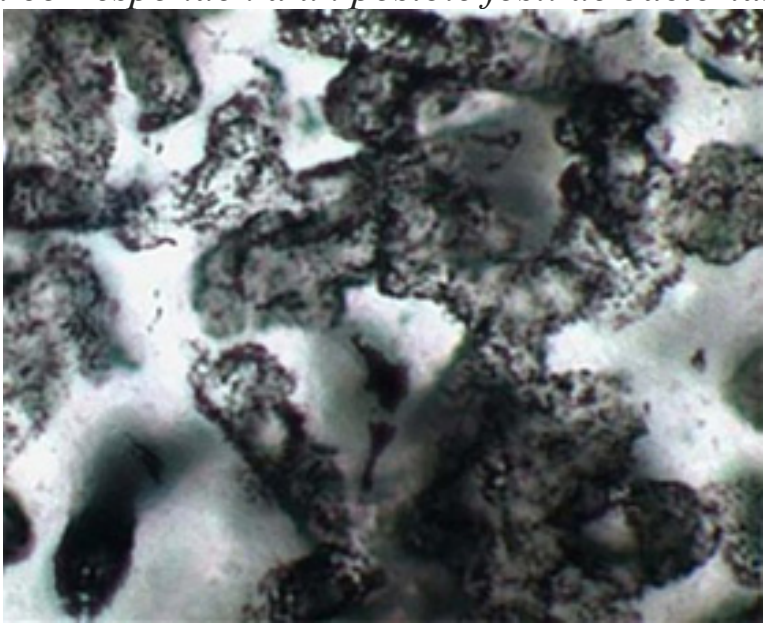


Microfósiles de Marble Bar, Australia, de 3.500 millones de años de antigüedad (Imagen: Science, fair use)

Comentamos ya en el capítulo primero, que correspondía a lo sucedido en el eón Hadeico, el hecho de que en las formaciones rocosas de Isua, en Groenlandia, datadas en hace unos 3.800 millones de años, se han encontrado claras evidencias de carbono de origen orgánico. También más arriba se ha mencionado los indicios encontrados en el cinturón sudafricano de Barberton Greenstone de lo que debieron ser uno de los más antiguos organismos fotosintetizadores de hace 3.300 millones de años. Pero la nómina de candidatos es variada y se va ampliando en el tiempo a medida que se van potenciando las investigaciones.

En primer lugar hablaremos del doble descubrimiento, en Australia y en Sudáfrica, de lo que fueron tapetes microbianos.[4] El australiano es de hace 3.500 millones de años -ver la foto anterior- y el segundo de 2.900 millones de años. Evidentemente (por su difícil fosilización) no hay restos biológicos de los organismos que los construyeron, pero su mera existencia permite conjeturar que en aquella época ya había vida.

En la figura siguiente podemos ver unas trazas halladas en algunas rocas de sílex de Australia occidental datadas en 3.500 millones de años de antigüedad, lo que le conferiría la etiqueta de uno de los organismo vivos más ancestrales, quizás algas verde-azuladas, del que se tendría una evidencia. No obstante *se ha especulado mucho acerca de si corresponden a un posible fósil de bacterias*.[5]



Fósiles de bacterias datados en 3.400 millones de años, encontrados en las areniscas de la región de Pilbara, Australia (Nature, fair use)

En 2011 se obtuvo lo que parece la **primera evidencia de fósiles reales** datan de hace **3.400 millones de años**, tratándose de bacterias que usaban el sulfuro en su metabolismo.[6] Se han descubierto en una zona rocosa sedimentaria de cuarzo y arena conocida como Strelley Poll, en la región de Pilbara (recordamos el antiguo cratón de Kaapvaal), al oeste de Australia**.** En el yacimiento los fósiles se encuentran junto a cristales de pirita que probablemente se tratan de subproductos del particular metabolismo de aquellos organismos que podemos ver en la foto anterior.

Pero hay más pistas. En las rocas de la zona de Strelley Poll, donde se han encontrado los anteriores fósiles, son características unas formaciones rocosas llamadas **estromatolitos**. Es un nombre que

viene del griego στρώμα, *strōma* "cama/alfombra" y λίθο, *litho* "piedra". Son de especial significado en el estudio de la Vida ya que, conjuntamente con la liberación del oxígeno molecular, quizás el más trascendental de esta época, constituye uno de los biomarcadores más claros y abundantes. Sus estructuras se pueden encontrar casi en cualquier momento de la cronología de todo el eón Arcaico, siendo especialmente comunes a finales del mismo.

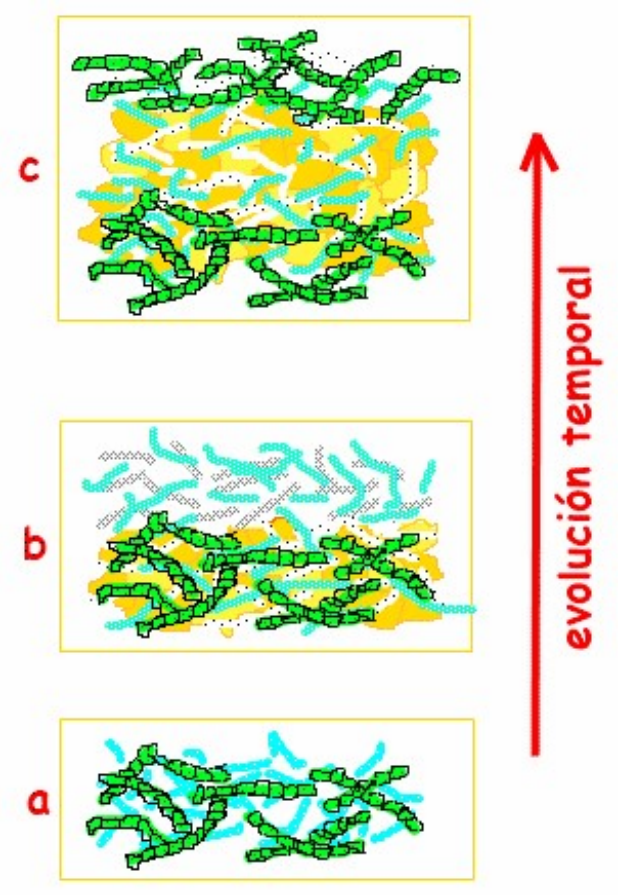



Estromatolitos modernos: formación en el mar (Wikimedia, GFDL 1.2) y corte (Wikimedia, dominio público)

Los estromatolitos son importantes formaciones fósiles que se comenzaron a formar como mínimo hace 3.700 millones de años -edad de los que recientemente se han encontrado en las ya conocidas formaciones rocosas de Isua en Groenlandia-,[7] con un máximo en su ubicuidad hace 1.250 millones de años, durante el Proterozoico. Posteriormente se redujo su abundancia y diversidad al aparecer organismos complejos que depredaban las bacterias que los construían, si bien actualmente continúan formándose en algunos lugares con aguas muy calientes y de alta salinidad, condiciones que protegen a sus cianobacterias. Los estromatolitos más antiguos que *conservan vestigios fósiles* de sus colonias bacterianas, datan de hace 2.700 millones de años.

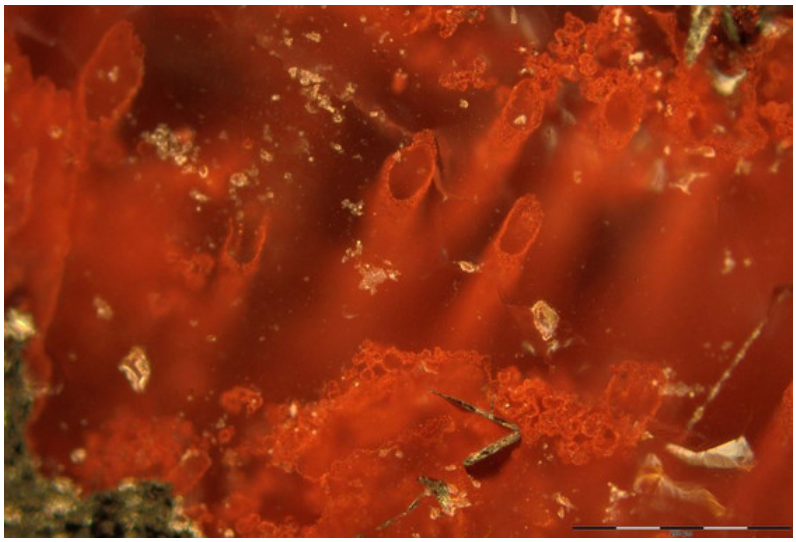
Se conoce bastante bien en qué consisten estas formaciones rocosas gracias a los estromatolitos actuales. Se trata de estructuras estratificadas con un proceso de formación *sui géneris*. Imaginemos una zona de aguas someras y templadas en donde se asentó una colonia de bacterias formando un extenso y fino tapete. Vivían obteniendo la energía a partir de la luz solar y se

alimentaban del CO_2 e hidrógeno del agua. Con el paso del tiempo este tapete se fue cubriendo con los limos disueltos en el agua que se iban decantando sobre el fondo, y con los carbonatos que las propias cianobacterias generaban, capa sobre capa. La supervivencia obligaba a estirar la cabeza y asomar por encima de la ahogadora capa cálcica y de fangos, produciéndose una migración a través de la capa de carbonatos, por lo que se formaba sobre ella una nueva capa de bacterias vivas. Muchas de ellas morían, pero otras conseguían continuar el proceso emigrando a la superficie del casquete mineral. Con el tiempo estas formaciones consiguieron construir estructuras incluso de varios cientos de metros de espesor. La presión de sus tremendos pesos las fosilizó.



Proceso de formación de los estromatolitos: a. primera capa bacteriana. b. Crece la corteza de carbonato cálcico, las bacterias luchan por sobrepasarla. c. Aparece una nueva capa bacteriana sobre la corteza de carbonato cálcico

En la misma época en que constatamos las primeras evidencias de vida en los estromatolitos, hace unos 2.700-2.600 millones de años, aparecen también las primeras huellas de microorganismos viviendo **en tierra firme**, fuera de las aguas. Se trataría de **tapetes microbianos** de cianobacterias, y han sido encontrados en Sudáfrica.



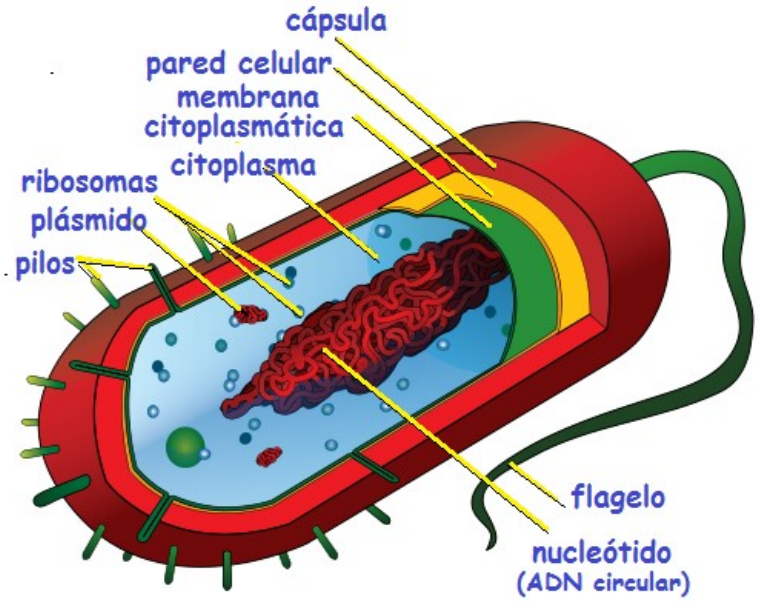
Tubos de hematites hallados en los depósitos de las fuentes hidrotermales que representan los microfósiles más antiguos de la Tierra (Imagen: Matthew S. Dodd, Nature 543, ver nota 8 a pie de capítulo, fair use)

Y como la curiosidad no descansa todo lo anterior parece superado con los resultados que publicó la revista Nature en marzo de 2017.[8] En las rocas de Nuvvuagittuq Supracrustal Belt en Quebec, Canadá, datadas entre 3.770 y 4.280 millones de años desde hoy, se han descubierto estructuras filamentosas de hematita -óxido de hierro- resultado de la acción biológica de bacterias. Las estructuras presentan unas ramificaciones que son idénticas a las que generan las bacterias del hierro que se encuentran cerca de fuentes hidrotermales actuales y obtienen la energía que necesitan para vivir por oxidación del hierro disuelto en las aguas de su medioambiente.[9] Estas estructuras se encontraron junto con grafito y minerales frecuentemente asociados con fósiles. Observamos a la Vida por lo menos a 3.770 millones de años de

nosotros… pero, cómo no pensar en extenderla temporalmente hasta el límite máximo que marca las rocas de Nuvvuagittuq ¡290 millones de años tras la formación de la Tierra!

Un merecido zoom sobre las bacterias

Hasta aquí hemos hablado mucho sobre las bacterias e incluso podemos imaginar que en aquellos años eran las reinas de la Tierra. Durante los millones de años del Arcaico habían ido modificando su forma de vida, a veces de forma progresiva y silenciosa, a veces a trompicones. Las podemos considerar un invento bastante perfecto a la vista de su ubicua expansión geográfica y de la vasta colonización de muy diversos nichos. La pequeña vacuola repleta de química había triunfado como unidad de vida: el microbio, la "vida pequeña" en sus dos vertientes de Eubacteria y Archaea.



Esquema de célula bacteriana (Wikimedia, dominio público)

Organismos unicelulares con un tamaño de unos pocos micrómetros (entre 0,5 y 5 μm, por lo general). En su interior, el material genético constituido por una molécula circular de ADN aún no estaba protegido por una membrana propia. Se cree que la selección debió favorecer la colaboración y unión de genes pequeños, e inicialmente independientes, formando una larga y

única cadena. Desde un punto de vista de eficacia para la labor de genes que fueran complementarios, y prácticamente todos lo eran durante aquellos inicios en que aún no les había dado tiempo a evolucionar en demasía, era mejor que el "equipo de trabajo" estuviera unido en una única cadena y por tanto todos se replicaran a la vez. Ello prácticamente aseguraba el que en el futuro siguiera la colaboración, sin lugar a dudas con una probabilidad mayor que si cada uno se replicase por separado y con su propio reloj. Además, el hecho de compartir un mismo reloj de replicación eliminó la competencia entre ellos, entre los que lo hacían más deprisa frente a los que lo hacían más despacio. Así se piensa que se inició el avance evolutivo de la cadena del ADN, el ancestro del cromosoma.

Las pequeñas bacterias son organismos asexuales que se reproducen por división simple, siendo las hijas clones de la madre, de la que heredan copias idénticas de genes. Cuando sus membranas se fragmentan en dos se duplica también el ADN y se reparte el citoplasma y los orgánulos internos.

A pesar de que según lo anterior parece que siempre se mantendrá de generación en generación el paquete genético idéntico, esto no es así. Su ADN está sometido a cambios, unos por motivos azarosos al producirse errores en el proceso de su duplicación o por la influencia de agentes mutagénicos, y otros al practicar una especie de sexo virtual cuando entre ellas mismas se da un intercambio de genes, proceso que es muy habitual y que se puede producir por contacto directo entre distintas bacterias o por transferencia a través del medio en que se encuentran. Todo un extenso menú de variaciones con el que consiguieron la diversificación tan extraordinaria que presentan.

Ya hemos comentado que los estudios filogenéticos moleculares han podido demostrar que existen dos familias principales, denominadas *Eubacteria* y *Archaebacteria*. Aunque son bastante similares en forma y en tamaño, tienen una historia evolutiva independiente y presentan muchas diferencias en su bioquímica.

Como ya hemos comentado más arriba, sus membranas están compuestas de diferentes fosfolípidos, así como lo son los polímeros que conforman sus cápsulas externas. Las archaeas poseen genes y varias rutas metabólicas que son más cercanas a las de los eucariotas, es decir son más "primas" nuestras, de los humanos, que las bacterias "auténticas".

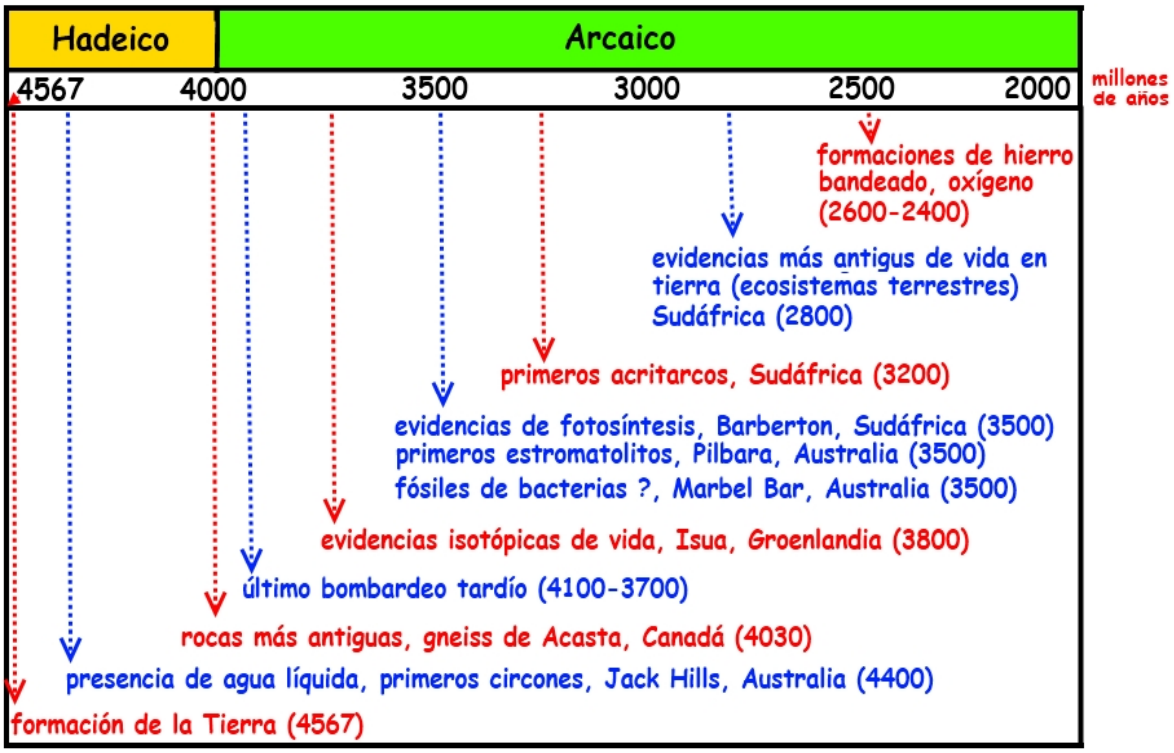
En aquella época ancestral ni unas ni otras debían ser muy distintas a sus tataranietas actuales, que constituyen el grupo de organismos más abundantes del planeta, con aproximadamente 22 filos.[10] Son ubicuas, encontrándose en todos los hábitats terrestres y acuáticos. Crecen hasta en los lugares más extremos, como en los manantiales de aguas calientes y ácidas, en desechos radioactivos, o en las profundidades tanto del mar como de la corteza terrestre. Algunas bacterias pueden incluso sobrevivir en las condiciones tan opuestas a la vida como las del espacio exterior. A una bacteria se la puede congelar o desecar y mantenerla así por años con la seguridad de que "resucitará" cuando se vuelva a encontrar con condiciones propicias.

Y aquí siguen, entre nosotros. Aunque el número de especies apenas alcanza el 0,5% de todas las especies vivas descritas actualmente, su biomasa global sería equivalente a la de todos los vegetales que cubren el planeta. Se estima que en un gramo de tierra cohabitan en torno a 40 millones de células bacterianas y un millón de ellas en un mililitro de agua dulce. En total, se calcula que hay aproximadamente 5×10^{30} bacterias en el mundo. En el cuerpo humano hay aproximadamente diez veces más bacterias que células del cuerpo propiamente dicho, principalmente en la piel y en el tracto digestivo.

¡Todo un éxito el de las reinas del Arcaico! ¿No?

Se acaba este eón y el siguiente salto evolutivo en la biosfera se hará esperar unos millones de años. La Tierra era un hervidero de vida, muy activo en su elementalidad, donde los seres procariotas perfectamente adaptados a su medio ambiente no necesitaban más

y tampoco aportaban más. Habría que permanecer con los dedos cruzados unos cientos de millones de años para que se diera un proceso simbiótico que desembocó en la célula eucariota, la célula con núcleo.



Esquema resumen de los principales hitos para la Vida durante el eón Arcaico

Mientras, la máquina geológica de la Tierra continuaba girando. La frontera con el Proterozoico no debió ser muy idílica. Un creciente vulcanismo afloraba nuevas masas de tierras que iban a seguir un rumbo gobernado ya por una decidida tectónica de placas. Los mares cálidos recibían cada vez más sedimentos de los florecientes continentes nuevos, mientras en sus aguas ligeramente ácidas se secuestraba al CO_2 en forma de carbonatos. En la atmósfera el oxígeno decía *¡aquí estoy yo!* amenazando la consistente Vida que con infinidad de trucos había llegado hasta estos años. Pero el proceso era ya imparable, pasase lo que pasase.

Su "misterio" se comenzará a desvelar durante el Proterozoico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 09:

1. "*A redox-stratified ocean 3.2 billion years ago*", Aaron M. Satkoski et al., estudio publicado en ScienceDirect de noviembre de 2015.
2. Podéis completar la opinión de Cavalier-Smith leyendo éste artículo, "*The phagotrophic origin of eukaryotes and phylogenetic classification of Protozoa*", publicado en "*International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*" (2002).
3. La crisis del oxígeno fue un cambio medioambiental muy importante. La emisión de dioxígeno -oxígeno molecular- al medio ambiente, producido por los primeros organismos fotosintéticos, eventualmente provocó una crisis ecológica -una extinción masiva- para la biodiversidad de la época, pues el oxígeno era tóxico para los microorganismos anaerobios dominantes entonces.
4. Este descubrimiento está reseñado en la revista Astrobiology nº 12 de 2013. "*Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia*", Nora Noffke et al.
5. Un ejemplo de ello lo encontramos en ésta publicación aparecida en 2015. "*Changing the picture of Earth's earliest fossils (3.5–1.9 Ga) with new approaches and new discoveries*", Martin D. Brasler et al.
6. Apareció publicado en la revista Nature de julio de 2011. "*Microfossils of sulphur-metabolizing cells in 3.4-billion-year-old rocks of Western Australia*", David Wacey et al.
7. Publicado en la revista Nature de septiembre de 2016. "*Rapid emergence of life shown by Discovery of 3.700 milion year old microbian estructures*", Allen P. Nutman et al.
8. La publicación mencionada es "*Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates*", Matthew S.

Dodd et al., que podéis encontrar en Nature de marzo de 2017.

9. Recordemos lo que decíamos en el capítulo número 05 acerca de esta posibilidad de "casa natal" para la Vida.

10. Los **filos** son las grandes agrupaciones de los organismos vivos de acuerdo a sus planes generales de organización corporal.

10. Abrimos las puertas del Proteorozoico

En el capítulo anterior dejábamos a las bacterias atravesando la procelosa frontera entre los eones Arcaico y Proterozoico. No por ello lo hacía con paso titubeante ¡todo lo contrario! ¡Unos seres que llevan sobre el planeta unos 4.000 millones de años no tendrían nada de débiles ni de indecisos!

Y aquí los tenemos en el nuevo eón, el Proterozoico. Duró desde hace 2.500 millones de años hasta hace 542, un 45% de la vida de la Tierra. Su nombre viene del radical griego *protero-,* que da significado de anterior o antiguo, y de la palabra griega *zoicos*, vida.

Hasta el nacimiento de este eón, la Tierra se había ido preparando meticulosamente para llevar a cabo una larga y exitosa travesía. Se había apaciguado el torbellino energético de sus inicios y los abundantes cratones se encontraban preparados para comenzar su aventura continental. El oxígeno estaba iniciando su expansión en la atmósfera y la vida bullía en busca de nuevas formas y oportunidades. Todo llevaba un ritmo de crucero para comenzar el gran laboratorio del Proterozoico.

Por eso tocará hablar de cómo las humildes eubacterias recorrieron un camino de adquisición de habilidades, que a la postre les conducirían a formar organismos complejos multicelulares. Estas habilidades entran de lleno dentro del mundo de la Biología y para comprenderlas se va a hacer necesario el profundizar en algunas materias claramente teóricas, como la genética, la división celular o la herencia. No obstante me atrevo a asegurar el que es harto entretenido adentrarse en los vericuetos de estos temas por lo que siempre tienen de sorprendente. Lo veremos en esta capítulo y sucesivas.

Hoy conoceremos el escenario, como hemos hecho al presentar a los eones anteriores, para finalizar introduciendo el gran avance de

diseño en las formas de los organismos vivos: la célula procariota se transforma en la célula eucariota.

El oxígeno consigue aparecer en escena

Como ya se ha comentado con anterioridad, uno de los eventos más importantes del Proterozoico fue el aumento de la concentración de oxígeno en la atmósfera de la Tierra. Las cianobacterias lo iban generando, y como ya no estaba sometido a las trampas de los minerales ferrosos, como sucedía durante el Arcaico, y puesto que los mares habían disuelto un porcentaje elevado de este gas, pasaba directamente a la atmósfera incrementando su población a lo largo de toda la era, de forma que a finales del Proterozoico -hace 540 millones de años- llegó a porcentajes semejantes a los actuales.

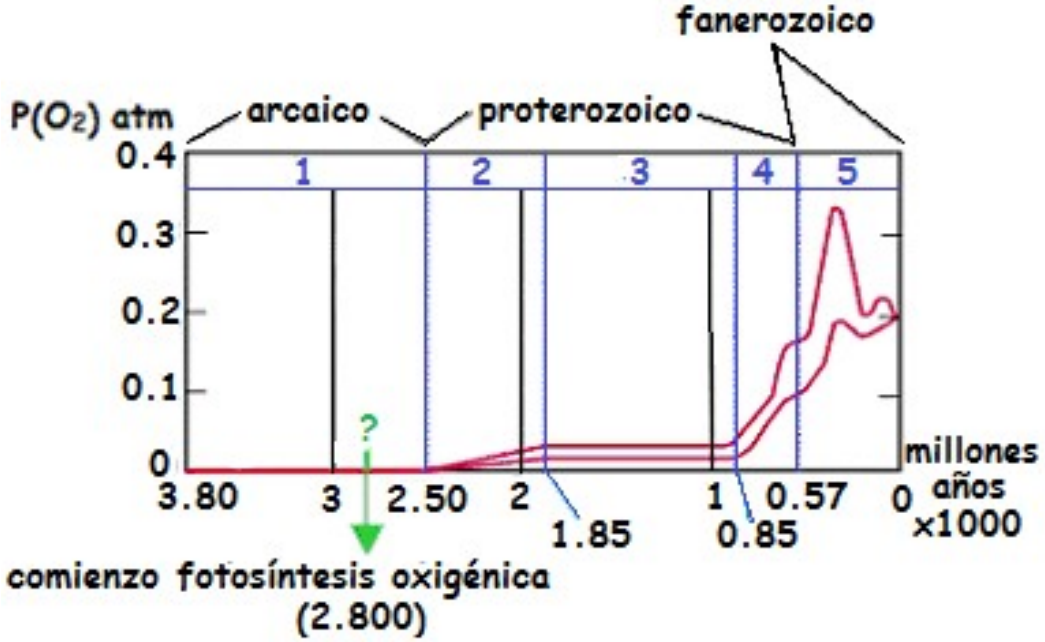
El incremento del oxígeno atmosférico fue determinante en los cambios climáticos subsiguientes.

Por su trascendencia y para una mejor comprensión de la evolución del O_2 en la atmósfera, se intercala la figura siguiente, en donde podemos apreciar cómo ha variado su contribución desde inicios del Arcaico hasta el día de hoy. La curva se da en unidades de presión parcial del mismo gas en el conjunto de la atmósfera, mientras que la escala temporal está en miles de millones de años.

En el periodo **1** *no se acumuló oxígeno,* ya que el que se generaba era capturado oxidando el azufre y el hierro, al igual que se combinaba con el CH_4 para dar CO_2, que era absorbido por los océanos y que luego pasaría a los organismos vivos. Poco a poco los *océanos y sus fondos rocosos absorbían el oxígeno* frenando así el ritmo de incorporación en la atmósfera; es el periodo **2**.

Pasamos al periodo **3** en el que el oxígeno había saturado el océano *pasando directamente a la atmósfera* en grandes cantidades, aunque su concentración se mantuvo limitada ya que aún debía saturar las tierras emergidas y además iba siendo transformado por la radiación ultravioleta en la alta atmósfera dando lugar a la

formación de la capa de ozono. A partir de hace unos 850 millones de años el oxígeno *se acumula en la atmósfera* hasta alcanzar el nivel actual (periodo **4**).



Evolución del contenido atmosférico de oxígeno a lo largo de los últimos 3.800 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El propio oxígeno cambió la composición de la atmósfera. Ayudado por la radiación ultravioleta barrió al amoniaco y al metano, que se transformaron en nitrógeno molecular y dióxido de carbono respectivamente, provocando con ello que nuestra atmósfera se aproximara a un patrón posiblemente muy parecido al de los planetas Marte o Venus. La amenaza fue conjugada en gran medida por las mismas cianobacterias que la habían producido, que permanecieron al quite del abundante CO_2 gracias a su laboriosa fotosíntesis. A ellas les debemos, pues, los hermosos colores azules de nuestro cielo y nuestro mar.

Además el oxígeno le prestó un buen empujón a la Vida. En aquellos momentos, y aún más que con respecto a ahora, dada la mayor cercanía del Sol,[1] desde el exterior llegaba con gran intensidad la radiación ultravioleta de alta frecuencia, que a pesar de ser una de las fuentes energéticas más importantes para el planeta producía unos efectos dañinos en la Vida que pululaba por

los mares, que no podía asomar la cabeza dado el alto riesgo de quedar achicharrada. Como ya hemos comentado, gracias al oxígeno se formó la capa de ozono en los estratos altos de la atmósfera, a través de un proceso por el que, gracias al empujón energético de las radiaciones ultravioletas, se iban disgregando alguna de las moléculas de oxígeno dejando un par de átomos superreactivos. Cada uno de ellos se unía rápidamente con un O_2 para dar una nueva combinación, materializada en una sola molécula de tres átomos, el O_3. El ozono de la estratosfera, a su vez, era capaz de absorber casi el 100% de la radiación que le llega. Todos estos procesos de absorción de radiaciones luminosas de alta frecuencia fueron equivalentes a la creación de un paraguas protector que permitió a la Vida poder abandonar el blindaje que proporcionaban las aguas, salir más tarde a tierra firme e iniciar así la expansión y la complejidad.

Y no podemos seguir adelante sin hablar de otro efecto beneficioso producido por la capa de ozono. Al filtrar en un porcentaje tan elevado a las radiaciones ultravioletas, éstas no llegaron en abundancia a la superficie de los mares. ¿Por qué fue esto tan importante? Porque antes del oxígeno, cuando sí llegaban con toda su intensidad, producían la rotura de las moléculas de agua de los océanos, desperdigándose sus componentes, oxígeno e hidrógeno, por la atmósfera. El oxígeno quedaba fijado al oxidar la tierra mientras que el ligero hidrógeno habría escapado al espacio. Hubiera sido muy posible que la pérdida de agua fuera muy grande, por lo que, por un segundo motivo el oxígeno, o mejor dicho, el ozono, nos alejó de un futuro marciano.

Gracias al oxígeno la Vida pudo evolucionar hacia organismos más grandes, ya que el metabolismo que se apoyaba en él como último receptor de electrones en las cadenas de obtención de energía, lograba ser hasta diez veces más eficiente que cuando se apoyaba en otras moléculas. No en vano el oxígeno, tras el flúor, es el elemento con mayor poder oxidante. Ello supuso que en cada salto de la cadena trófica, de predado comido a predador comedor, el aprovechamiento del alimento pudiera ser diez veces superior. De

esta manera, dada una cantidad determinada de nutrientes de base, su aprovechamiento podía alcanzar a un mayor número de organismos en la pirámide de la Vida, pudiendo estos acometer funciones cada vez más complejas apartándose cada vez más de la simplicidad bacteriana.

Pero dejemos el canto de alabanza a nuestro "padre" oxígeno y volvamos a la cotidianidad de los acontecimientos.

De los pequeños cratones a los megacontinentes

En aquellos momentos la litosfera estaba fragmentada en escudos que se movían flotando sobre materiales inferiores más densos. Se estaba consolidando por primera vez este fenómeno que ha durado hasta la actualidad: **la tectónica de placas y consiguiente deriva continental**. Durante este eón se produjo una **acreción continental rápida y masiva**, ciclos de supercontinentes, presentando una gran dinámica tanto de movilidad como de fragmentación y reagrupamiento. Eso hacía que durante los movimientos de acercamiento o separación, en los momentos en que las placas emergidas estuvieran relativamente cerca, fueran creándose plataformas continentales con espacios de aguas someras y cálidas, en donde la vida tenía que ser prolífica. De hecho la geología ofrece evidencias de plataformas continentales de hace 1.500 millones de años.

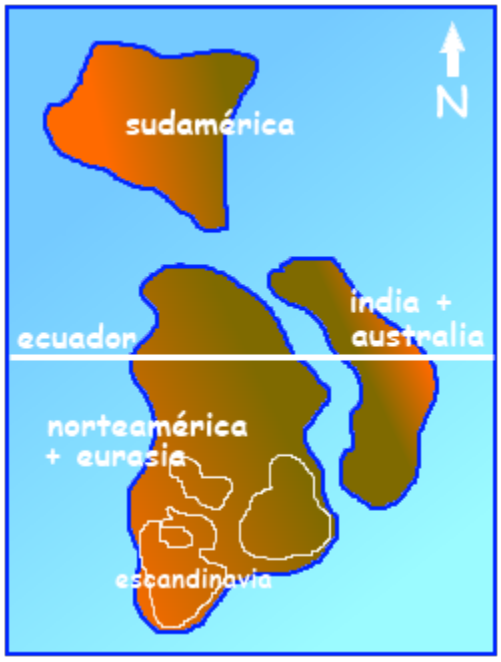
También debido a esto, en el Proterozoico se generaron muchos estratos que fueron depositados en los extensos mares epicontinentales de aguas superficiales. Por otro lado, en consonancia con el enfriamiento interno del planeta y la inherente "tranquilidad" geológica, las antiguas rocas magmáticas y depósitos sedimentarios de aguas profundas del Arcaico se fueron transformando, modificándose hacia estructuras que corresponden a rocas metamórficas y sedimentaria: **de las volcánicas komatitas y las formaciones de hierro bandeado del Arcaico se pasó a los carbonatos y cuarcitas del Proterozoico.**

En la frontera entre el Arcaico y el Proterozoico los océanos que aún dominaban la superficie del planeta estaban siendo ocupados por el continente Kenorland que ya conocemos de inicios por lo que dijimos en el capítulo 06 "*Entramos en el eón Arcaico*". Ya hemos comentado que el incremento del oxígeno atmosférico facilitó la oxidación del metano. El resultado es que por cada molécula de CH_4 aparecía una de CO_2. Como este último, el dióxido de carbono, provoca un menor efecto invernadero que el primero, el metano, la Tierra entró en un periodo de intensas glaciaciones, cuyo principal exponente fue la **glaciación Huroniana** de hace unos 2.300 millones de años. No se sabe muy bien qué es lo que pudo desencadenar los acontecimientos que llevaron a su fin, pero posiblemente fue un nuevo episodio generalizado de vulcanismo.

Los cratones que salieron de la glaciación eran tremendamente activos e iban formando ya lo que podríamos llamar **grandes continentes**, los que iban a conformar los actuales por deriva sobre el magma. El continente **Atlántica** que consolidaba lo que hoy es el este de Sudamérica con el oeste africano, se estabilizó en el entorno de hace 2.100 millones de años. Un poco más tarde (hace unos 1.800 millones de años), en el norte hacía lo mismo el continente **Nena** (acrónimo de **N**orte de **E**uropa **N**orte de **A**mérica).

En sus derivas se daban épocas de unión, con grandes océanos y mares internos someros, y épocas de dispersión. Las colisiones continentales originaron **importantes orogenias** (formación de montañas). Era el preludio de los futuros supercontinentes, aquellos que llegaron a reunir a todas las tierras emergidas de su momento, factor que, como veremos más tarde, condicionó en gran medida la climatología de la Tierra y la evolución de la Vida. Parece casi imposible imaginar, viéndolo desde hoy en día, cómo podemos estar seguros de estos movimientos geodinámicos. Pero un simple análisis geológico sobre distintos continentes hoy en día separados, evidencia en ellos un claro *alineamiento de las cadenas montañosas* que surgieron como consecuencia de aquellos

plegamientos; como también lo evidencia la coincidencia de *estratos geológicos similares* en estas zonas. También los *datos paleomagnéticos* -resultado de la deriva magnética de los minerales magmáticos solidificados en el momento de la orogenia- permiten asegurar que en aquellos tiempos se pudo producir la reunión de la mayoría de los continentes en un supercontinente.



Posible distribución de tierras durante el continente de Columbia

Posiblemente el primero de ellos fue **Columbia**, que existió hace entre 1.800 y 1.500 millones de años. Su tamaño se compara al del futuro Pangea, madre de los continentes actuales. Se estima que tendría cerca de 12.900 kilómetros de norte a sur, y cerca de 4.800 kilómetros en su parte más ancha. Según el geólogo John Rogers, de la universidad de Carolina del Norte en Estados Unidos, la costa este de la India estaba unida a Australia y a su vez con Norteamérica y Canadá. La mayor parte de Sudamérica estaba girada al revés de manera que su borde occidental -actualmente la costa pacífica- se alineó con el este de América del Norte, formando un margen continental que se extendía hasta el sur de Escandinavia.

Con posterioridad, hace 1.100 millones de años, se llegó a formar el súper continente **Rodinia**, resultado de la fragmentación de

Columbia -debido a una época de gran actividad volcánica- y que a su vez se disgregó unos 300 millones de años después. Las grandes tensiones en el choque y subducción de placas durante el proceso de su formación generaron la **orogenia de Grenville**, de hace unos 1.100 millones de años, observable a la vez en diversas y separadas regiones de la geografía actual. El supercontinente Rodinia se comenzó a desmembrar hace unos 750 millones de años. En el mapa siguiente se puede ver la disposición de este continente cuando era una masa de tierra distribuida a través del ecuador, así como las zonas donde se dio la orogenia de Grenville, con la posición que ocupaban entonces las actuales masas continentales.



Rodinia con la simulación de las tierras actuales

Tierra bola de nieve

Por el estudio de los sedimentos de Rodinia, de cuando este continente estaba iniciando su proceso de disgregación, se cree que en esta época se produjo un periodo de intensa glaciación -hace unos 710 millones de años-, durante el cual casi toda la Tierra estuvo cubierta por grandes masas de hielo, alcanzándose temperaturas medias de -50°C. Duró al menos unos diez millones de años. La Tierra surcaría entonces el espacio como una gran bola

blanca de hielo, de ahí su evocador nombre: al periodo se le conoce como “Tierra bola de nieve”. Hay evidencias geológicas de una nueva glaciación 75 millones de años después, en las que los glaciares llegaron a ocupar posiciones ecuatoriales.

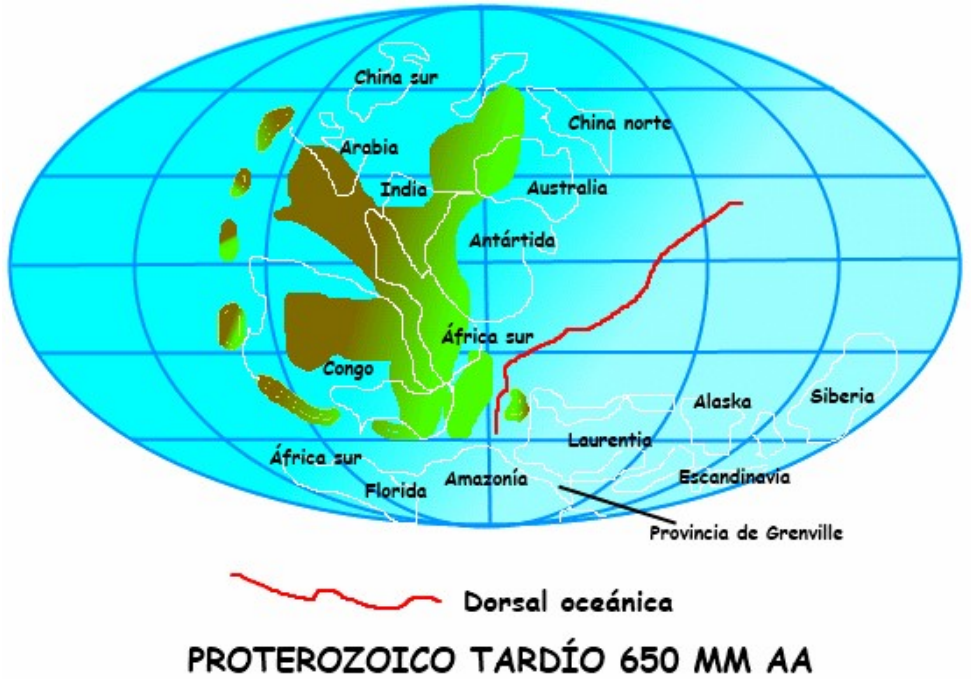
¿Cuáles pudieron ser las causas? El incremento del oxígeno atmosférico, como ya hemos comentado, indujo una desviación del contenido atmosférico de metano a dióxido de carbono, con la consiguiente debilitación del efecto invernadero y la caída de las temperaturas. La disposición espacial de Rodinia, que formaba un vastísimo territorio en posición ecuatorial, hacía que la mayoría de las tierras no disfrutaran del efecto moderador de temperaturas que ejerce el océano. La consecuencia de ello fue que las regiones internas de tierra, a excepción de la franja tropical, tuvieran un clima continental extremadamente seco debido a la falta de precipitación y a la vez extremadamente frío. Los continentes tropicales, además, reflejan mucha más luz solar que los océanos por lo que la reunión de las tierras en una única masa sobre el ecuador habría aumentado el albedo en el planeta.[2] Todo ello pudo haber iniciado el proceso de glaciación que se fue realimentando a medida que la cantidad de nieve y hielo aumentaba sobre la superficie, circunstancia que a su vez volvía a incrementar el albedo, reforzando la situación de glaciación.[3]

Se cree que la salida de este episodio se debió, paradójicamente, a la propia situación de bola de nieve unido a la actividad volcánica que en aquellos momentos, en que Rodinia se iba disgregando, debió ser importante. La capa de hielo sobre los océanos y las tierras había roto el ciclo del carbono impidiendo que el CO_2 fuera capturado por los mecanismos habituales en los que participa de forma importante la meteorización de las rocas y la recaptura en forma de minerales carbonatados en el fondo del mar.

Todo ello unido, emisiones volcánicas y menor efecto sumidero, hizo que el dióxido de carbono fuera incrementando paulatinamente su participación en la atmósfera lo que impulsó un crecimiento progresivo del efecto invernadero, que a la fin provocó

la fusión de los hielos superficiales. Se pasó en las temperaturas medias del planeta de los -50ºC a los +50ºC.

Los restos de Rodinia se volvieron a reagrupar formando a **Panotia** hace 650 millones de años. Este nuevo supercontinente ocupaba una posición norte-sur, desde latitudes próximas a los 50º norte hasta el Polo Sur. Hacia el final del Proterozoico, sólo unos 60 millones de años después de haberse formado, comenzó su disgregación.



Panotia con simulación de las tierras actuales. Comparando con el mapa anterior de Rodinia podemos ver la intensidad de las derivas continentales a lo largo de unos 350 millones de años.

La Vida

Éste era el escenario en donde la vida que venía del Arcaico encontró la presión y los incentivos necesarios para su evolución hacia morfologías y funcionalidades más variadas y competitivas, dentro de un nuevo entorno cada vez más agresivo debido al incremento del oxígeno en la atmósfera.

Al comienzo del Proterozoico las bacterias eran las reinas de la Tierra. Habían ocupado todos los posibles nichos ecológicos de los

mares. El agua era necesaria para la vida, aunque también habían desarrollado múltiples estrategias de supervivencia, aprovechando cualquier oportunidad que la química les ofrecía para modelar variados caminos metabólicos. Un mismo patrón fenotípico y biológico se adaptó a la infinita variedad de la naturaleza marina y a las condiciones de su frontera con la atmósfera.

Al final de los casi 2.000 millones de años que duró el Proterozoico seguían ellas, microscópicas e invisibles, dominando la biosfera. Sin embargo, no permanecieron estancadas: se había abierto una ventana hacia la complejidad.

De los ocho hitos de la evolución de la Vida planteados por los reconocidos biólogos y genetistas John Maynard y Eörs Szathmàry, durante este eón se llevaron a cabo tres: El paso de la célula *procariota a la eucariota*, la aparición de la *reproducción sexual* y el inicio de los *organismos multicelulares*.

Nada mejor como colofón de este capítulo que las propias palabras de Maynard y Szathmary, de su libro "*Ocho hitos de la evolución. Del origen de la Vida*":

"Aunque hemos dicho que el origen de las eucariotas es una de las mayores transiciones, realmente fue una cadena de sucesos: la pérdida de la rigidez de la membrana celular, la adquisición de la habilidad de alimentarse de partículas sólidas; el origen de un citoesqueleto interno y de nuevos métodos de locomoción de las células, la aparición de un nuevo sistema de membranas intracelulares, incluyendo la del núcleo; la separación espacial de los procesos de transcripción y de traducción; la evolución del material genético hacia cromosomas con forma de bastón y múltiples puntos en donde se puede iniciar la replicación, con lo que se eliminaban serias limitaciones para el crecimiento del genoma; y finalmente el origen de los organelos de la célula, en particular la mitocondria y, en algas y plantas, los plástidos. De estos avances, al menos los dos últimos los tenemos que calificar como grandes transiciones en el sentido que representan grandes

cambios en la manera en la que la información genética se almacena y trasmite".

Esto es lo que vamos a ver a partir de ahora. En los capítulos siguientes vamos a analizar cómo se fueron produciendo cada uno de los avances en la morfología y en las relaciones entre los organismos que habitaron el Proterozoico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 10:

1. En éste artículo, "*Secular increase of the Astronomical Unit: a possible explanation in terms of the total angular momentum conservation law*", Takaho Miura et al., encontramos una explicación de esta sorprendente circunstancia que lo explica en base a la conservación de la cantidad de movimiento angular.
2. El **albedo** es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol.
3. En el siguiente enlace

   [*https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:SIM_neoproto.ogv*]

   podéis ver una interesante simulación realizada por la NASA de lo que pudo pasar en aquellos momentos. Se ha supuesto que la concentración de CO_2 era del 40%, la energía solar recibida un 96% de la actual y un transporte de calor realizado por los océanos reducido a la mitad del de hoy en día. Podemos ver cómo a partir de los polos se va extendiendo la masa de hielos hasta cubrir la práctica totalidad del planeta.

11. Aparecen las células eucariotas

A estas alturas de la narración nos encontramos en pleno Proterozoico, un largo periodo que fue desde hace 2.500 a 542 millones de años. En el capítulo anterior dejamos listo el escenario dando un avance de la vida privada de sus habitantes, las bacterias procariotas. Ahora nos toca progresar estudiando cómo evolucionó su morfología hasta la célula eucariota, con núcleo interno, para en otros capítulos posteriores profundizar en las habilidades que permitieron tal avance.

De célula procariota a eucariota

La revolución se produjo más o menos en el entorno de hace unos…

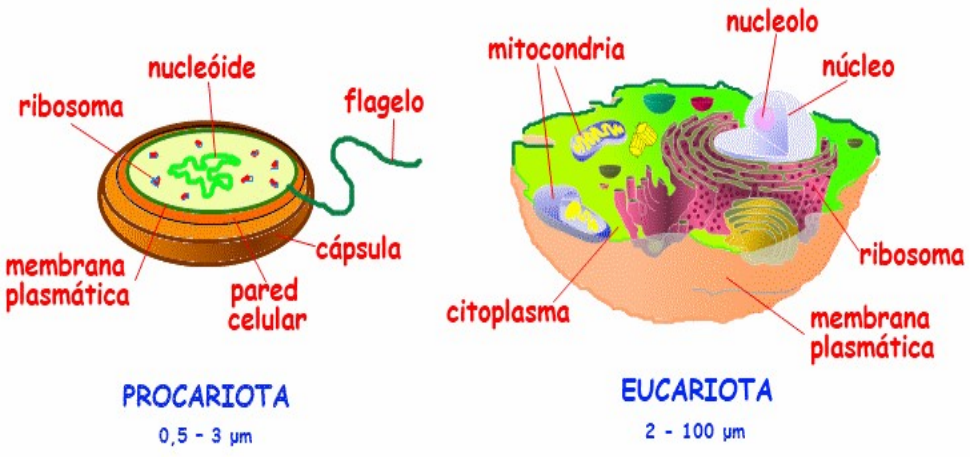
Realmente no hay una opinión común sobre cuándo se originaron las células eucariotas. Si atendemos a las posibles evidencias fósiles nos deberíamos remontar a hace más de 2.000 millones de años, aunque hay algunos investigadores -Cavalier-Smith con su revolución neomura de la que hablamos en el capítulo 09, "*La vida en el Arcaico*", que lo atrasan hasta hace sólo 900 millones de años.

Sea cuando fuera, se produjo una revolución al producirse un nuevo cambio en la química de las envolturas exteriores celulares. Lo que supuso un trascendental avance: algunas bacterias *flexibilizaron sus membranas exteriores* añadiendo en ellas glicoproteínas. Con ello **ganaban elasticidad**, circunstancia que supieron aprovechar sus descendientes las eucariotas adoptándola para sus necesidades de alimentación y movimiento.

No obstante, la pérdida de rigidez de su membrana externa podía representar una desventaja, ya que suponía un punto de fragilidad como consecuencia de la disminución de resistencia frente a la presión hidrostática de su interior. Pero lo compensaron creando un

citoesqueleto interno que les proporcionó no sólo resistencia estática sino también versatilidad dinámica al poderse deformar, lo que suponían unas novedades bastantes ventajosas para su subsistencia. El citoesqueleto, o al menos sus bases iniciales, no debió ser un invento original de las eucariotas, ya que también las procariotas disponían de las dos principales proteínas que forman su estructura, la actina y la tubulina. Esta circunstancia deja la duda de si el citoesqueleto pudo ser desarrollado directamente por la propia eucariota o quizás haber evolucionado en una célula procariota ancestral, que con posterioridad habría entrado en el interior del citoplasma de la eucariota, manteniendo ambas una relación de simbiosis.

Resulta significativo el hecho de que la actina es una de las dos proteínas directamente implicadas en la motilidad de los músculos. Una prueba más que refuerza la idea de la existencia de antepasados comunes entre animales y procariotas.



Una sencilla comparación entre la célula procariota y la eucariota, esta última con la complejidad de sus múltiples orgánulos (Wikimedia, GFDL 1.2)

Al ser la membrana de la eucariota más flexible y tener capacidad dinámica para modificar su forma, disponía también de una teórica aptitud mediante la que podía en algún punto invaginarla hacia dentro del citoplasma, como quien le da la vuelta a un calcetín. En algún momento esta habilidad le permitió "tragarse" una cierta cantidad de materia prima que era útil para su metabolismo y

crecimiento. Siempre se había "alimentado" gracias a la permeabilidad de su membrana celular, pero al ser el nuevo proceso también eficaz y competitivo, la selección natural protegió a los organismos que lo adoptaron. Como resultado de las fagocitosis, que es como se llama este mecanismo, dentro del citoplasma empezaron a quedarse vacuolas aisladas por membranas de estructura similar a la celular, vacuolas que comenzaron a multiplicarse y relacionarse, colaborando entre ellas, fusionándose y creando **nuevas organizaciones membranosas internas** con una variada e importante funcionalidad. No nos olvidemos que en ellas se encuentra la factoría energética de la célula, vía la generación del ATP.

La eucariota disponía también de un nuevo elemento, el **núcleo**, separado del propio citoplasma por una de estas membranas internas. El núcleo es el puesto de mando de la célula eucariota, en donde está empaquetada la información genética en forma de cromosomas. Fuera del núcleo, en el citoplasma, además de las membranas derivadas de la citoplasmática exterior se encuentran abundantes vesículas y el mencionado esqueleto interno, muy dinámico, en el que encuentra un soporte estructural y con el que la célula podía realizar un amplio abanico de nuevos "trucos": rigidez a la par de plasticidad, cambiar de forma y moverse, y nuevas estrategias para su alimentación y reproducción. Uno de los principales orgánulos internos era la mitocondria, personaje que ya ha salido en esta historia, auténtica fábrica de energía, de las que puede haber hasta 100.000 en una sola célula. Hay otros, como los ribosomas o el aparato de Golgi que son elementos fundamentales en la gestión de las nuevas proteínas. Y qué decir de los cloroplastos de las células vegetales auténticas placas fotovoltaicas. A vista de pájaro podemos imaginar a las células eucariotas como un mórbido globo gelatinoso de forma mutante, pero con una intensa vida propia.

Con ellas se abrió la posibilidad de la reproducción sexuada y la herencia de los caracteres paternos. De todo ello hablaremos más tarde, a lo largo del siguiente capítulo.

Sin embargo, vistas las características que diferencian a la célula eucariota de la procariota, surgen un sinfín de preguntas que no se reducen solamente a querer saber cómo aparece el núcleo celular -lo que parece ser el estereotipo del cambio entre ambas-. Ya hemos hablado de cómo se perdió la membrana exterior. Hoy comentaremos cómo se incrementó la superficie de membranas internas disponibles para su metabolismo y cómo se consiguieron los orgánulos citoplasmáticos. En capítulos siguientes continuaremos analizando cómo se pasó de un cromosoma circular a cromosomas lineales y cómo se duplicó la carga genética hasta dos juegos de cromosomas equivalentes. Comentaremos también el por qué del triunfo de la transmisión de la herencia vía fusión de dos células haploides (las que tienen un solo juego de cromosomas), por qué fue seleccionado el éxito del proceso reproductivo de la meiosis y el por qué de hacerlo a través una doble meiosis. Intentaremos aclarar también la aparente paradoja de por qué hay dos tipos de gametos, masculino y femenino, y además diferenciados en su tamaño.

Los primeros pasos hacia los nuevos orgánulos del citoplasma

Comenzaremos por explicar cómo aparecieron los nuevos corpúsculos citoplasmáticos incluido el nuevo núcleo. La teoría mejor aceptada en el mundo de la biología, hoy por hoy, es la que explica la historia de los progresivos cambios desde la célula procariota a la eucariota mediante una serie de endosimbiosis, por las que sus orgánulos adicionales serían descendientes de procariotas que colonizaron el citoplasma de una célula "protoeucariota". Esta teoría, aunque se originó en el siglo XIX, fue replanteada por el biólogo ruso K. Mereschkowsky en 1910 y defendida definitivamente en toda su extensión por la prestigiosa bióloga norteamericana Lynn Margulis en 1967.

Todo se basa en que las mitocondrias -las fábricas energéticas- y los plastos -los centros de la fotosíntesis y grandes almacenes de materiales necesarios para su metabolismo- de las células eucariotas se parecen mucho a seres unicelulares procariotas.

Ambos orgánulos, *diferentes al núcleo*, ***contienen también su propia carga de ADN***. Además, su estructura, el ARN que generan y las proteínas y enzimas que expresan son más parecidas a las de las bacterias que a las de las células eucariotas.

La simbiosis entre estas antiguas células debió ser el resultado de un proceso de aproximaciones sucesivas, posiblemente consecuencia de un medio ambiente competitivo. Quizás **todo pudo empezar con la formación de una protoeucariota** según la plausible explicación que en 1998 dieron los profesores William Martin y Miklós Müller, conocida como la *teoría del hidrógeno*. Vamos a rastrear lo que dice esta teoría.

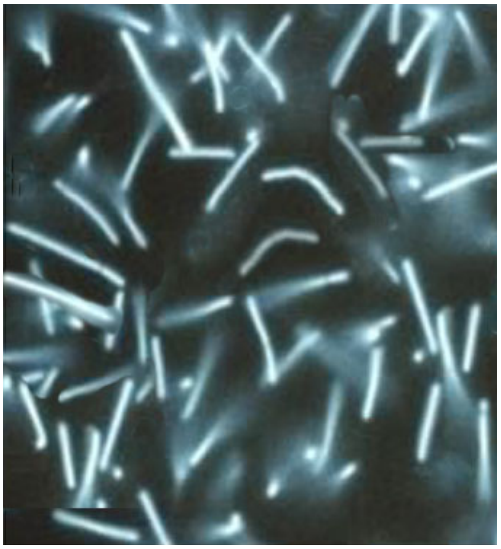
Este modelo da explicación a los curiosos parecidos entre los aparatos genéticos y también de algunas enzimas *de las arqueas y las eucariotas*, así como los que se dan también *entre eubacterias y eucariotas* en los procesos de generación de lípidos y de gestión energética de sus metabolismos. Son pistas de partida que permiten considerar a la "fusión simbiótica" de bacterias como el paso precursor de la aparición de mitocondrias y plastos en las eucariotas.

En aquel mundo del Proterozoico nos es fácil figurar la infinitud de encuentros que debían producirse entre sus habitantes. Podemos imaginar a una primitiva y "voluminosa" arqueobacteria quimioautótrofa cuando en un día de escaseces se encontró con una pequeña eubacteria fermentadora.

Ya sabemos que la primera, la arquea, obtenía la energía que necesitaba para su vida a través de un proceso anaeróbico que dependía del hidrógeno. Bien pudiera ser una bacteria metanógena que se escondía del eventual y tóxico oxígeno que iba apareciendo sobre la Tierra, chapoteando en un lodazal u oculta en las profundidades de los mares, sin más movilidad que la que le inducía el medio en donde estaba inmersa.

No podía aumentar mucho su tamaño pues la energía la sintetizaba en su pequeña membrana y por tanto no disponía de mucha. Ya

sabemos que en las membranas celulares es donde se fabrican las "píldoras" del energético ATP. Y la suya daba para lo que daba. Si aumentaba su volumen, sus necesidades metabólicas aumentaban con el *cubo* de su crecimiento, mientras que su membrana, su fábrica de energía, aumentaba con el *cuadrado*. Las cosas eran así de simples, de forma que en su normal desarrollo no tardaba mucho en llegar a su madurez, y se dividía y se dividía a toda velocidad, sin crecer desmesuradamente de tamaño.



La arquea metanógena Halobacteria, cada célula mide aproximadamente 5 µm de longitud (Wikimedia, GFDL 1.2)

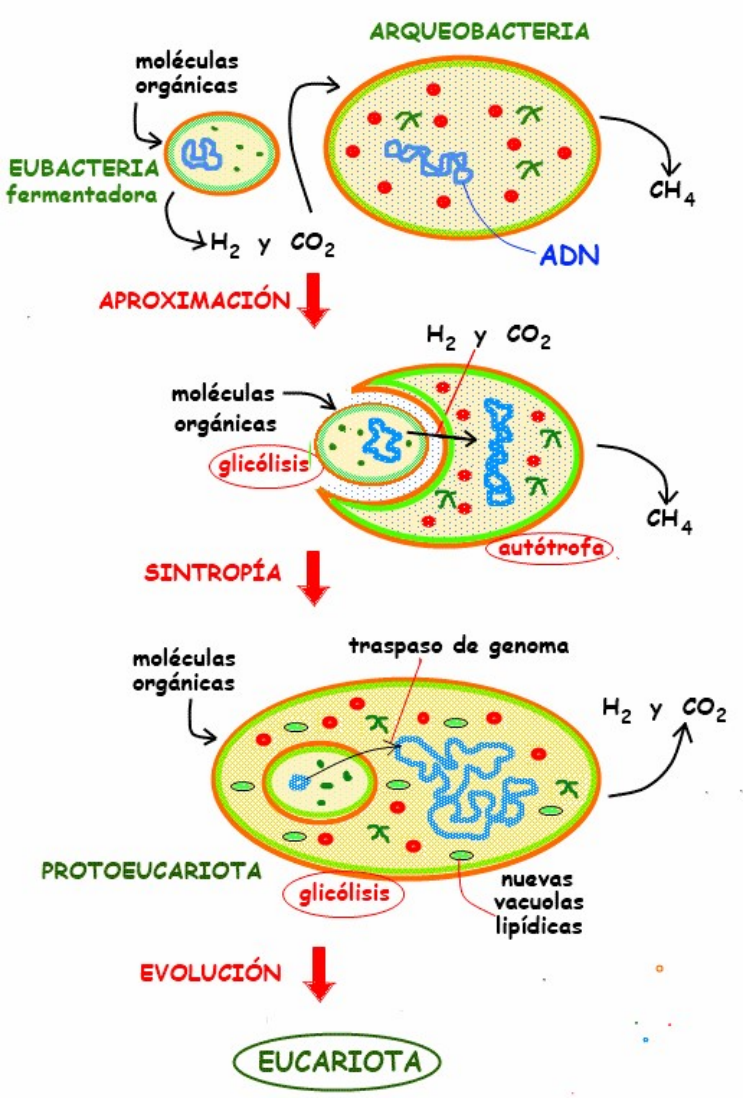
Por el contrario, la diminuta fermentadora obtenía su energía de compuestos químicos orgánicos sin necesidad de usar el oxígeno. Había visto que en la gran arqueobacteria había alimento y se acercó. Poco a poco comprobaron que los materiales excretados por la fermentadora, entre otros H_2 y CO_2, debían ser complementarios de los que necesitaba la gran arqueobacteria. La alternativa de acoplar sus procesos podía ser viable y por ello la experiencia no fue vetada por la selección natural. Se unieron, pues, entrando la pequeña y habilidosa comedora de glucosa en el citoplasma de la grande y dependiente arqueobacteria.

La nueva realidad supuso la suma de dos membranas y, por tanto, un incremento de la superficie en donde se generaba el ATP, la

energía vital para el perfecto funcionamiento y la posibilidad de desarrollo y crecimiento del conjunto. Pero surgió un problema ya que la pequeña bacteria fermentadora debía alimentarse a sí misma y a la vez a su huésped ¡mucho metabolismo para tan frágil organismo! La cosa se solucionó mediante un "acuerdo" entre interesados: una oportuna mutación *duplicó parte del genoma de la fermentadora, copia que cedió a la gran arqueobacteria*. Esta lo incorporó a su anillo de ADN aprendiendo así a "digerir" por sus propios medios la materia orgánica, siguiendo el mismo método con que lo hacía la fermentadora. Eran los mismos genes los que dirigían la función.

Pero, además, la cesión de parte del genoma de la hospedada a la hospedadora solucionaba otro problema. En un principio, antes de que esto hubiera ocurrido, la fermentadora metabolizaba mucho más rápidamente que la "gigantesca" arquea al ser la más pequeña del consorcio. Sus genes debían expresarse diez mil veces más rápidos que los de su "casera", más estables y en consecuencia propensos a conservar más las mutaciones. Todo ello suponía una crisis tremenda cuando sus respectivos ribosomas, de la arquea o de la fermentadora, fabricaban la misma proteína desorientados sin saber a qué gen hacer caso, si al lento y no mutado o bien al rápido y mutado. Se trataba de un terrible problema de supervivencia. Con el traspaso de genomas de una a otra esto se resolvió.

La unión de ambas bacterias fue un acuerdo muy útil, ya que abrió la puerta para que la arquea se hiciera no con una, sino con cientos de fermentadoras: había resuelto su problema de tamaño y energía mediante la adición de membranas ajenas sintetizadoras de ATP. Y aún más: algunos de los genes trasvasados eran los que expresaban la síntesis de los fosfolípidos que formaban la membrana de la fermentadora ¡miel sobre hojuelas! como afirma el dicho popular. Una vez estos genes en la arquea empezaron a hacer lo mismo, por lo que se produjo una sobrepoblación de lípidos en su citoplasma. Espontáneamente se agruparon en vacuolas, fueron creciendo y constituyeron las semillas de las múltiples membranas citoplasmáticas de las eucariotas, incluida la membrana nuclear.



Modelo de Martin y Müller sobre el origen de las eucariotas, 1998 (a partir de "On the origin of cells", Martin y Russell, fair use)

Con el tiempo, y mientras los nuevos genomas de la arquea tomaban las funciones de los de las antiguas compañeras fermentadoras, estos últimos se hacían obsolescentes desapareciendo parcialmente del aparato genético de la simbionte. De forma que hoy en día en el genoma eucariota se detectan dos tipos de genes, los "informacionales" dedicados al tema de herencia que se parecen a los de las arqueas, mientras que los "operacionales" del metabolismo y la ontogenia se parecen más a los de las bacterias. En el proceso se había conquistado muchas habilidades y adquirido también algún que otro problema: las

cadenas ADN conocidas como transposones. Venían de serie con el genoma de la fermentadora y eran expertos en hacer continuas e inútiles copias de sí mismos, dificultando los procesos normales de la asociación de simbiontes. Recordad a estos personajes pues hablaremos de ellos más adelante, sobre todo al discutir la transmisión de la información de los genes a las cadenas proteínicas.

Y esta es la teoría sobre la aventura procariota que le llevó a procrear una eucariota. Veamos ahora como pudo ser la historia real.

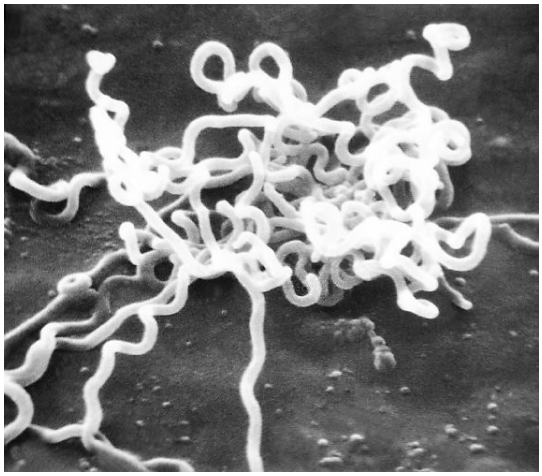
La primera sociedad simbiótica

Resulta tremendamente complejo, sino imposible, el determinar cuál pudo ser la secuencia cronológica de este salto evolutivo celular. Los tiempos profundos del Proterozoico son eso, profundos, y es muy difícil obtener una base fósil completa que ayude a ello.

Podemos pensar que la simbiosis entre células, descrita en los párrafos anteriores, exigía una cierta habilidad fagocitadora al menos en una de ellas. Sabemos también que las membranas de las procariotas son bastante rígidas y que se requirió una revolución en sus proteínas para obtener la elasticidad necesaria. Gran dilema temporal que puede situarse entre lo que creemos son los primeros fósiles conocidos de eucariotas -de hace 2.100 millones de años- hasta la revolución Neomura[1] de hace 900.

El primer paso pudo ser el siguiente. Una *espiroqueta*, otro tipo de bacterias procariotas, con una habilidad exclusiva para desplazarse mediante un movimiento ondulante, lo que le facilitaba la búsqueda del alimento, se topó con nuestra procariota mutante, quién sabe si ya una eucariota con núcleo, y vio que tras su membrana había un mundo húmedo y lleno de nutrientes de los que vivir. Comienza un ataque y prosigue con una larga pelea, hasta que aparece el punto de interés común que propicia la útil tregua.

El resultado es que la espiroqueta se avecinó en la eucariota mayor y le ayudó en su movilidad.



Espiroqueta Treponema pallidum (Wikimedia, dominio público)

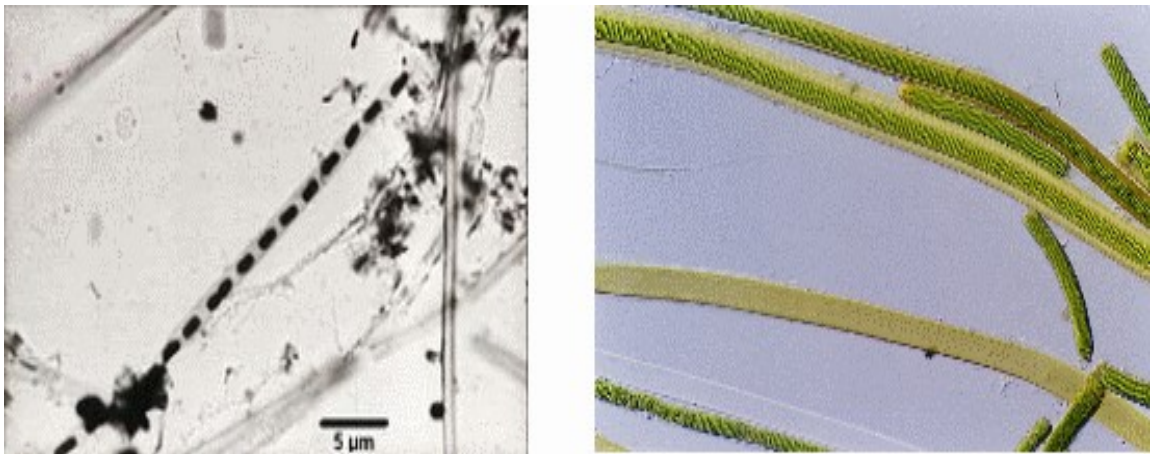
Nuevas compañeras inauguran un nuevo mundo

Los años pasaban sobre la Tierra y, como ya hemos comentado, el oxígeno empezó a apretar: la atmósfera se fue llenando de este gas venenoso. Y a nuestra protagonista, con sus espiroquetas, no le quedó más remedio si quería sobrevivir que pensar en un imposible. Pero los imposibles a veces se hacen probables o ciertos. En un cierto momento, junto a ella, pasó otro tipo de bacteria con su propio material genético y un rarito, en aquel momento, metabolismo ya que se llevaba muy bien con el nuevo gas asesino: una protobacteria respiradora aeróbica, posiblemente una bacteria púrpura como una de las actuales *Paracoccus*.

Respirar oxígeno a nivel metabólico significa usar el oxígeno en el proceso de quema de carbohidratos, siguiendo el ciclo de Krebs según ya sabemos,[2] y así tener un suministro de la energía necesaria para vivir. Se produjo una nueva simbiosis por la que ambos unicelulares aprendieron a defenderse juntos del oxígeno, uniéndolo a moléculas orgánicas y en forma de inofensivos CO_2 y H_2O. Con una ventaja adicional ya que por el camino se conseguía ATP de una forma más eficiente de lo que se solía practicar hasta entonces. Una vez más la solución se manifestó claramente viable

y competitiva, por lo que una "quimera nadadora que respiraba" se abrió paso en la historia de la Evolución con mayúsculas.

De esta manera se habían introducido en el diseño de la Vida, casi sin permiso, **las mitocondrias**. Según comenta Lynn Margulis en su libro "*Planeta simbiótico*", esto pudo suceder hace unos 1.000 millones de años.

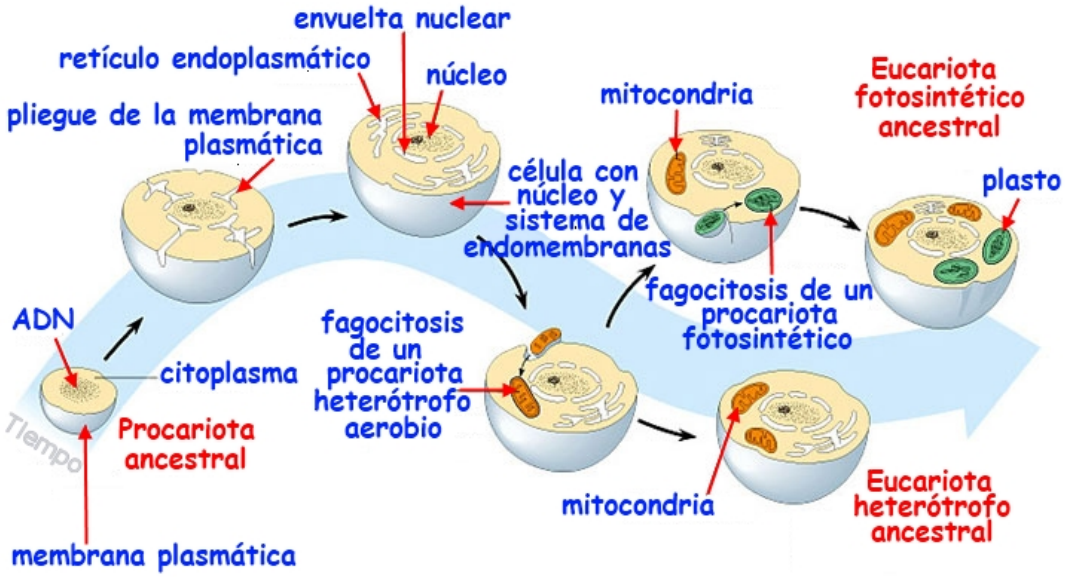


A la izquierda la bacteria púrpura Leptothrix (Wikimedia, CC BY-SA 3.0) y a la derecha la cianobacteria Lyngbya (Wikimedia, dominio público)

Más tarde se asoció otra bacteria con algunos de esos simbiontes, una verde cianobacteria que sabía fotosintetizar. Del tipo de las que estaba en aquellos momentos causando la hecatombe ecológica del cambio hacia un mundo aeróbico. Sería semejante a una actual cianobacteria *Synechococcus* que lo mismo vive en la superficie de los océanos formando parte del plancton, que vive disfrutando de lugares a 75ºC. Se demostró también que era una unión evolutivamente viable y prosperó el nuevo ser camino de las algas unicelulares y las plantas más complejas. Estas cianobacterias pasaron a ser los cloroplastos de las células vegetales.

Se estima[3] que la aparición de los primeros plástidos en una célula eucariota se produjo hace unos 1.500 millones de años. Lo cual permite pensar que la fusión que inició las mitocondrias pudiera ser anterior a los 1.000 millones de años que apuntaba Margulis.

Tres simbiosis cambiaron el planeta: A excepción de la que se llevó a cabo con espiroquetas, de la que aún no se tienen evidencias claras, el resto de la teoría de Lynn Margulis sobre la simbiogénesis está fuertemente demostrada y aceptada por el mundo científico. Apoya al convencimiento el hecho de que la simbiosis es un tipo de asociación muy común en la biosfera actual. También es extremadamente revelador que el material genético de las bacterias respiradoras actuales, las que viven en la naturaleza de forma independiente, se asemeje muchísimo al propio material genético de las mitocondrias. Pasa lo mismo entre las actuales cianobacterias y los cloroplastos. Y lo que parece más significativo, en el interior del citoplasma las mitocondrias y cloroplastos se reproducen de forma independiente al proceso de división celular, como si tuvieran vida propia.



Esquema de la evolución de una célula eucariota a partir de un procariota ancestral (Imagen: ISE Rayuela, Móstoles, España, fair use)

La aparición del núcleo eucariótido

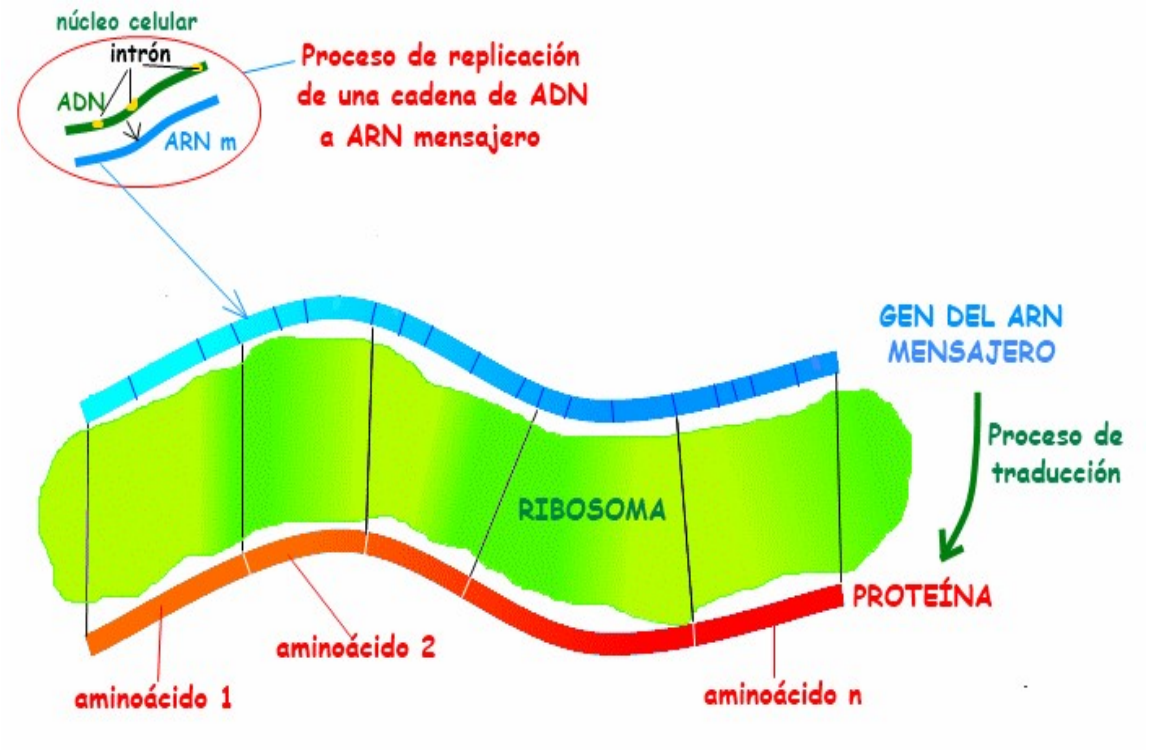
Quizás durante las constantes luchas inherentes a las simbiosis que se estaban produciendo, y como una estrategia de defensa, la gran arqueobacteria fundadora aisló su material genético con una

membrana. O pudo ser que esto sucediera después de la fusión de los materiales genéticos de los simbiontes. El resultado fue el **núcleo celular** en el que el ADN en anillo inicial se fue reestructurando y dividiendo, formando los cromosomas. Fue la gestación de la primera célula eucariota que ya nunca más fue una bacteria.

¿Cuál fue el motor de esta revolucionaria innovación? Seguramente fueron muchos y variados. En el proceso pudo influir la incremental presencia del oxígeno libre en el planeta, que iba ejerciendo una presión con matices selectivos, de forma que se hicieron viables aquellas bacterias que preservaron a su genoma de una oxidación destructiva aislándolo con una membrana.

Hay una teoría aún más elaborada,[4] presentada por los biólogos William Martin y Eugene Koonin, que basa la creación del núcleo en circunstancias diferentes a las provocadas por la abundancia del oxígeno. Más adelante, en otro capítulo, profundizaremos en el conocimiento de los genes, intrones y exones. Basta aquí saber de la existencia de los transposones, que se encuentran mezclados en la cadena de genes del ADN que expresan las proteínas: unos "tramposos" a los que se les llama intrones. Por estudios filogenéticos se ha podido determinar que provienen de un gen antiguo, que se comportaba un poco como un virus: entraba y salía de los ADN como quería. Una vez dentro, cuando en un ribosoma se estaba llevando a cabo el proceso de traducción de una cadena de ARN a proteínas -hablaremos de ello en otro capítulo posterior-, llegaba lógicamente un instante en que el turno de traducción era el de un intrón. En este momento la respuesta del intrón era semejante a la acción de unas tijeras, se separaba de la cadena de ARN, se independizaba y cortaba el proceso de generación de la proteína. Una vez libre se replicaba, siendo así que los gemelos acababan unidos al ADN en cualquier sitio. Algunos de estos genes saltarines fueron perdiendo su capacidad de independencia y se quedaron fijos en la estructura del ADN, *lo cual no era bueno para la bacteria ya que con ello creaba unas proteínas un tanto extrañas y fuera de su propósito*.

En las primitivas bacterias intervinieron la evolución y su rápido metabolismo, consiguiendo expulsar a los intrones de las vidas de las procariotas. Cosa que no ha sucedido en las eucariotas, en las que quedaron vestigios residuales de estos genes saltarines. ¿Tendrán alguna relación estas conflictivas secuencias de nucleótidos, los intrones, con la existencia del núcleo celular?



Traducción de la información del ARN mensajero en el ribosoma con el resultado de la síntesis de una proteína. En la figura se representa el proceso en una eucariota con núcleo. En una célula procariota el ribosoma está literalmente pegado al ADN.

Ya sabemos que cuando se creó la quimera por simbiosis entre una fermentadora y una arquea, esta última se pudo encontrar con algunos intrones anarquistas de las fermentadoras. Al no existir aún el núcleo aislado el proceso de síntesis de las proteínas lo llevaban a cabo el ARN en los ribosomas literalmente pegados al ADN. El proceso era rápido y no lo podían seguir los intrones "inactivos", mucho más lentos en su copiado y por tanto con un efecto tijera retardado. La velocidad de generación de la cadena de la proteína era superior a la velocidad con que los intrones pudieran haberse

independizado de la cadena del ARN traductor. Las proteínas que se generaban en los ribosomas debían salir bastante defectuosas, incluso letales, con algunos aminoácidos extraños: todo un gran problema. De alguna forma había que **separar temporalmente** la corrección de los errores que provocaban los intrones *adelantando este proceso al de fabricación de proteínas*. Y lo mismo daba separación cronológica que espacial. Así que la arqueobacteria encontró una solución drástica al tema: creó una membrana porosa alrededor del ADN, una membrana que no tenía nada que ver con las típicas membranas celulares, mediante la que aislaba la acción tijera de los intrones -que a partir de entonces sucedía dentro del núcleo- del proceso de fabricación de proteínas, que se hacía fuera. Por los poros pasaba el ARN mensajero limpio a la búsqueda de los ribosomas que quedaron fuera fabricando las cadenas de aminoácidos.

¿Fue éste el camino por el que la selección protegió la membrana nuclear?

Pudo ser. Aunque lo significativo son los hechos. Al final de este complejo proceso la novedosa célula eucariota había heredado las habilidades adquiridas a partir de los miembros de los sucesivos consorcios. Había aumentado su capacidad energética, por lo que pudo moverse más y fagocitar. Con ello se le incrementaron las posibles vías de captura de alimentos. Ya no necesitaba un metabolismo rápido como el viento para buscarse la vida y reproducirse, le sobraba energía para actuar sin prisas. El truco de convivir con los intrones le permitió abrir un abanico de variados genes que codificaron más tipos de proteínas. Se abría camino entre otros al colágeno, a la queratina, a enzimas precursoras de la lignina… actores básicos de las futuras estructuras animal y vegetal. El hecho de no necesitar un metabolismo tan rápido como el de las bacterias le concedía suficiente tiempo al ADN para asimilar mutaciones y duplicaciones de genes, que aumentaron la longitud de sus cadenas y su complejidad, con lo que podía transmitir más información. Realmente se habían abierto las puertas hacia un nuevo mundo.

Los inicios de la historia fósil de las eucariotas

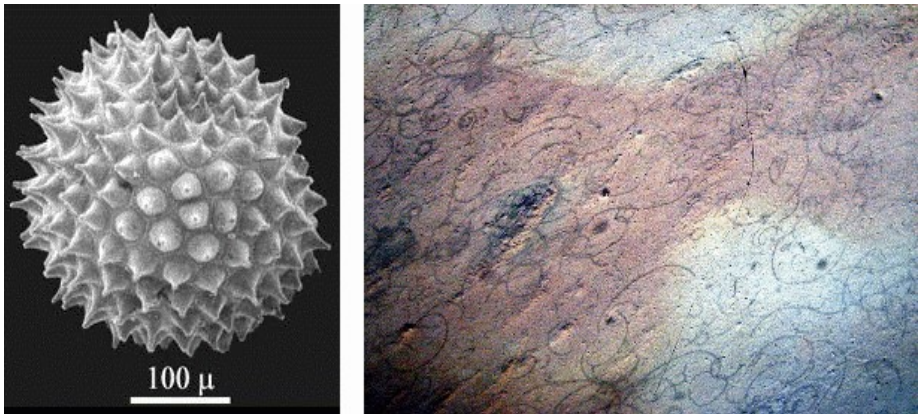
Las eucariotas se originaron muy atrás en el mundo precámbrico al desgajarse su rama de la rama de las *Archaea*. El árbol filogenético de las eucariotas fija dos líneas principales: la *Unikonta -un solo flagelo-,* por aquello de que muchos disponen solamente de uno de estos apéndices, y la *Bikonta* con dos. Entre los primeros se encuentran las amebas, hongos y animales, mientras que en los segundos están las plantas y otros grupos.

A su ancestro común se le denomina el LECA: *Last Eukaryotic Common Ancestor* por similitud al LUCA, común ancestro de todos los seres vivos. Gracias al análisis [5] de proteínas que las más antiguas arqueas han transmitido a las eucariotas, se ha determinado que el LECA tendría que ser más parecido a un *Bikonta* que a un *Unikonta*. Es decir, sería un ser unicelular con núcleo y dos flagelos. En 2015 se descubrió en el fondo del océano Ártico un nuevo tipo de arqueas cuyo genoma procariota, por lo que se sabe hoy en día, es el más parecido al eucariota. Se trataría de las *Lockiarchaeota* que podrían ser por tanto la imagen actual del LECA.

Es difícil de valorar cuándo debió aparecer LECA, ya que las células son blandas y tienen muy pocos elementos que puedan dejar un resto fósil. Muchas arqueas de la actualidad no disponen de paredes celulares (sólo membrana citoplasmática) y hay que suponer que así eran las más primitivas, de forma que estos organismos raramente han dejado fósiles reconocibles. Esto no quiere decir que el registro fósil del Precámbrico no pueda dar pistas sobre la evolución de las eucariotas. Y como anunciamos al acabar el capítulo anterior vamos a ver cómo nos lleva mucho más adentro en la profundidad de la edad del planeta.

Hasta hace poco se creía que las eucariotas más antiguas habían dejado unos fósiles conocidos como acritarcos. Se parecen a esporas o quistes producidos por las algas de hoy en día. El

acritarco más antiguo se ha encontrado en China y tienen una edad comprendida entre 1.800 y 1.900 millones de años.



Acritarco (crédito de la imagen: Virginia Tech, astroseti.org licencia Creative Commons) y Grypania spiralis (Wikipedia, GFDL 1.2)

Sin embargo perdieron su récord al saberse que el fósil de *Grypania spiralis* es aún más antiguo. *Grypania* es una especie de organismo macroscópico con forma de cinta enrollada, y que se cree que quizás pertenezca a un temprano grupo eucariota. Se encontró en unas rocas hallados en la formación Negaunee Iron en Míchigan que están datadas en 2.100 millones de años.



Fósiles precámbricos de organismos eucariotas coloniales de Gabón (África) datados en 2.100 millones de años (Abderrazak El Albani et al, 2010, Nature, fair use)

En 2010 se ha reportado el descubrimiento en Gabón (África) de una serie de organismos, posiblemente ya **eucariotas con costumbres coloniales**, también de hace unos 2.100 millones de años.

Un poco posteriores, 1.900 millones de años, son los fósiles del yacimiento canadiense de Gunflint. La mayoría de los investigadores consideran que son antiguas bacterias aunque el biólogo alemán Wolfgang Kumbrein opina [6] que se tratarían de las evidencias más tempranas de especímenes del reino taxonómico Fungi -los hongos-. En 2017 se reportó el descubrimiento en Chitrakoot -India central- de lo que con casi toda evidencia -en este caso ya hay una gran certidumbre- son algas rojas *Rafatazmia chitrakootensis* y *Ramathallus lobatus* incrustadas en estratos de estromatolitos datados en hace 1.600 millones de años, anteriores en mil años a lo que luego fue la gran "explosión" de vida en el Cambrico.[7] De 400 millones de años más tarde proceden unas estructuras multicelulares llamadas *Bangiomorpha pubescens*, encontradas en el ártico canadiense, y que se interpretan como probables algas rojas.

La aparición de *Grypania spiralis* o de los fósiles del Gabón se producía unos 200 o 300 millones de años después de que comenzara el incremento de la concentración de oxígeno atmosférico. En aquellos momentos el clima global y la dinámica de la corteza terrestre eran relativamente estables, mientras que el nivel de nutrientes a disposición de la cada vez más abundante masa de organismos vivos llegaba a ser relativamente escaso. Se supone que tales condiciones fueron motores favorecedores de la aparición de las eucariotas. Pudo ser que la disminución de nutrientes favoreciera la evolución de simbiosis entre células que, al complementarse reciclando unas a otras sus residuos metabólicos, suplementaban los cada vez más escasos aportes externos a sus necesidades alimenticias.

Hasta aquí la historia de como se consiguió la pieza fundamental para que la evolución continuara, la célula eucariota.

NOTAS DEL CAPÍTULO 11:

1. Hablamos de ello en el capítulo 09 "*La vida en el Arcaico*".
2. Ya lo vimos en el capítulo 08 "*El metabolismo constructor*".
3. La información de detalle la podéis encontrar en éste artículo, "*The Origin of Plastids*", Cheong Xin Chan et al., en el dominio Scitable de la revista Nature de 2010.
4. Ved ésta publicación de la revista Nature de marzo de 2006. "*Introns and the origin of nucleus-cytosol compartmentalization*", William Martin y Eugene V. Koonin.
5. Aparece en ésta publicación, "*Bacterial proteins pinpoint a single eukaryotic root*", Romain Derelle et al., de la revista PNAS de octubre de 2014.
6. "*Gunflint Chert Microbiota Revisited - Neither Stromatolites, Nor Cyanobacteria*", artículo de Wolfgang Kumbrein mencionado en el texto.
7. "*Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae*", Stefan Bengtson et al., publicación de este descubrimiento aparecida en PLOS Biology de marzo 2017

12. La reproducción sexuada

En el capítulo anterior vimos como la evolución "inventó" la célula con núcleo. Era condición necesaria para poder intentar el salto a una reproducción sexuada. Por reproducción sexuada entendemos aquella modalidad en la que la carga genética, normalmente de dos individuos, puede mezclarse abriendo una posibilidad de cambio adicional a la espontánea variación por mutación de los genes individuales. Todo se lleva a cabo a partir de la fusión de dos células haploides -las que tienen en su núcleo un solo juego cromosómico- dando una diploide -de doble juego cromosómico-.

Si lo pensamos, esta forma de supervivencia del acervo genómico paradójicamente supuso la entrada en escena del hecho de la muerte del individuo. Hasta entonces las bacterias generalmente se dividían en dos hijas, las dos exactamente iguales a la madre, con lo que podemos pensar que sobrevivían por duplicado… y así hasta el final de los tiempos. Sin embargo con la reproducción sexuada el genoma sobrevive en los hijos, pero los individuos progenitores desaparecen tarde o temprano. Esto que puede ser un gran dilema filosófico se ve sobrepasado por la "irracional" naturaleza, que nos lo plantea como un camino más de éxito para la Vida. Pasemos a diseccionar el contraintuitivo fenómeno de la reproducción sexuada.

Bryan Sykes, genetista de la universidad de Oxford, en su libro "*La maldición de Adán*" propone una teoría que explicaría el porqué de la aparición de la reproducción sexuada. Sería la condición necesaria para la supervivencia de los organismos complejos. Es una obviedad decir que en la biosfera conviven desde la más humilde bacteria hasta el mamífero más sofisticado. Y que ambos pueden estar en continua situación de agresión/defensa. La bacteria salmonela puede arruinar la vida al humano, aunque durante el largo camino de convivencia este último haya desarrollado mecanismos de protección. Sin embargo la velocidad

del metabolismo suele ser directamente proporcional a la simplicidad del organismo que lo maneja. Es decir, una bacteria tiene una mayor probabilidad de desarrollar y acumular mutaciones en los códigos genéticos que le dictan sus estrategias de ataque. Mientras que un ser más organizado mantiene un metabolismo más lento y por tanto manifiesta una debilidad a la hora de ir acumulando mutaciones que le puedan servir para su defensa. La reproducción sexuada en estos últimos sería la respuesta para no ser alcanzado nunca por el agresor en esta carrera armamentística: el intercambio genético entre individuos, y con dos era suficiente, facilitaría la expansión a toda la población de las mutaciones que se manifestaban útiles para la defensa. Según esto la reproducción sexuada fue la clave imprescindible para que los organismos complejos pudieran sobrevivir a las enfermedades microbianas.

La senda evolutiva de la reproducción sexuada

Establecido un posible porqué, volvemos a las manos del maestro John Maynard que razona de la siguiente manera acerca de la senda evolutiva que llevó al detalle operativo de la reproducción sexuada, para él uno de los ocho hitos en el camino de la Vida:

Hubo un momento previo a todo el proceso que consistió en la *ruptura del ADN circular* de las procariotas en varios fragmentos lineales -los cromosomas-, lo que favorecería la velocidad de replicación, ya que ésta podía empezar en varios puntos a la vez (en el ADN circular de las procariotas siempre empieza por un punto fijo hasta completar la replicación del círculo). Pudo ser que los transposones introducidos por las mitocondrias -y de los que ya hablamos el capítulo anterior- favorecieran el corte del ADN circular en tramos lineales. La teoría de Maynard continúa a través de varios pasos evolutivos, siendo posiblemente el primero la *duplicación de la carga cromosómica* dentro de una célula -aparecen dos juegos idénticos de cromosomas-, proceso que se abrió camino ya que debía ser una circunstancia ventajosa para la corrección de errores del ADN. El siguiente eslabón sería una *división tipo meiosis*, algo semejante a la división simple de las

bacterias, y que se explicará en un capítulo posterior, por la que se generarían dos células "normales" haploides, que tendrían por tanto una carga genética simple, un solo juego de cromosomas. Una vez "inventadas" las células haploides, éstas podían fusionarse y dividirse mediante un solo paso de meiosis.

Lo anterior puede parecer un contrasentido. Las células habían conseguido duplicar sus cromosomas y sin embargo, con posterioridad, triunfa la vía de dividirse en dos cada una de las células hijas con una carga cromosómica única, para volverse a fusionar formando de nuevo una célula diploide: ¿el resultado final no era lo mismo, a fin de cuentas? Fue así por un detalle ventajoso: con la segunda vía a veces se generaban híbridos que eran más vigorosos que las copias exactas producidas tras la simple duplicación cromosómica, ya que se mezclaban mejor las cargas genéticas de ambos progenitores, permitiendo que las mutaciones buenas se reforzaran y las malas se aislaran y desaparecieron del acervo genético de la población.

La teoría de Maynard contempla una última modificación que nos lleva ya a la realidad actual: en la división celular se añadió un *segundo paso de meiosis,* quedando el primero como matraz en donde se producía una alteración favorable, quizás una de las más importantes, que se concretaba en un *entrecruzamiento de cromosomas* -del que hablaremos también en un capítulo posterior-, lo que enriquecía aún más la probabilidad de variabilidad genética.

Con el anterior procedimiento quedaba asegurada una eficaz y segura transmisión de la carga genética de padres a hijos. Dos seres fusionan el material genético de sus gametos -célula sexual masculina o femenina- en una única célula que generará un nuevo individuo.

¿Dos gametos desiguales?

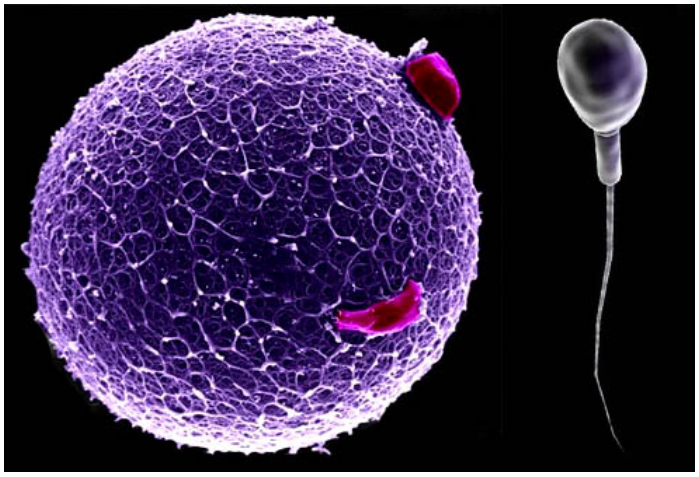
A lo largo de este camino se gestó también una modificación muy significativa: la *anisogamia* -"*no, igual, gametos"*-, la diferencia de

tamaño entre los gametos masculinos y femeninos. Queda por explicar la aparente rareza.

Ya en 1972 G. A. Parker, R. R. Baker y V. G. F. Smith propusieron una teoría para explicarla.[1] El éxito de un gameto depende de la posibilidad de encontrar una pareja. Para ello el organismo que los produce puede optar por dos soluciones. La primera consistiría en dotar a todos los gametos con su carga genética y suficiente "bagaje alimenticio" como para que, mientras le dure, pueda encontrar a su análogo.

En la otra alternativa se podría generar dos tipos de gametos. Unos muy móviles, ligeros sin tener que cargar con nutrientes, y en gran cantidad, con el objeto de aumentar la probabilidad de encontrar pareja por su número casi infinito. Por contra el segundo tipo de gametos serían grandes y escasos, con mucho alimento en sus mochilas, estáticos, puesto que no podrían cargar con su peso, a la espera de sus contrapartes que revoloteaban ágiles en su búsqueda. El éxito de ambos gametos dependió de la colaboración entre ellos mientras coevolucionaban: hay que suponer que en un estadio inicial debieron tener un tamaño semejante, hipotéticamente equidistante al de los del final del proceso evolutivo. A medida que se avanzaba por este camino se produjo una selección que favoreció la alternativa *grande/pequeño*, penalizando las soluciones intermedias *demasiado grandes*, pues eran poco móviles, y las *demasiado pequeñas* pues agotaban sus reservas antes de encontrar pareja.

Acudimos de nuevo al profesor Bryan Sykes que nos da una posible explicación de la coevolución de óvulos y espermatozoides que aparece en la anterior teoría. Se ha observado en la naturaleza que algunas algas verdes desarrollan dos estrategias de vida, la habitual como células haploides, y la de "emergencia" cuando las condiciones medioambientales se complican, que es cuando acuden a la fusión de dos individuos para crear una especie de espora. La fusión de los núcleos es pacífica pero no así la de los citoplasmas con su carga de organelos.



Gametos femenino y masculino humanos mostrando en todo su esplendor la anisogamia (Wikispace, CC BY-SA 3.0)

Entre ellos se produce una batalla de aniquilación de forma que prácticamente sólo uno de los citoplasmas queda con sus mitocondrias y demás vecinos. Esta reacción suele ser muy común en la batalla entre células semejantes. Cuando la idea la traspasamos a los gametos que deben fusionarse, es fácil imaginar que en algún momento pudo llegarse al límite de la "sumisión": Uno de ellos llegó a perder su citoplasma quedando como un saco portador de ADN nuclear y alguna mitocondria donde obtener la energía para mover el flagelo, mientras que el otro aportaba la morfología celular completa. Realmente este es el caso de espermatozoides y óvulos, machos y hembras ¿por qué no pudo ser algo parecido lo que llevó a la anisogamia?

El porqué del éxito

Hay que decir que existen otras estrategias diferentes a la reproducción sexuada para conseguir el objetivo de variabilidad en los genes. Podemos afirmar que la facultad de modificar la carga genética ya la dominaban los seres procariotas, puesto que las bacterias, y por diversos procedimientos, son capaces de intercambiar paquetes de genes en un proceso que no supone división celular. El producto de este intercambio entre dos organismos sigue siendo ellos mismos, aunque con un distinto camino futuro que será dirigido por la nueva carga genética.

Lo anterior ha sido el detonante de alguna teoría. Ya que el intercambio lateral de genes, y por tanto el factor de diversidad, lo practicaban también las asexuales procariotas, ¿por qué la necesidad de inventar algo nuevo como el entrecruzamiento sexuado? Aquí cabe pensar que la reproducción sexuada apareció como una respuesta defensiva frente a las amenazas incorporadas por los intrones de las mitocondrias en las menguadas poblaciones iniciales de eucariotas. Al principio de la correspondiente simbiosis, la población de eucariotas era pequeña en número y con pocos genes, ya que las células eran aún muy primitivas y no había habido tiempo suficiente como para que se hubieran producido muchas duplicaciones en su ADN. Por tanto, en aquellos momentos cualquier mutación dañina podía fácilmente alcanzar a todos los individuos. El cruce de sexos fue el gran truco que favoreció la erradicación de los genes nocivos. De ahí su éxito.

Parece pues que la reproducción sexuada fue un éxito anunciado, aunque no por ello nos podemos olvidar que presenta con respecto a la reproducción asexual ciertas desventajas relacionadas con la eficacia: el primer tipo de reproducción, la sexual, es menos rápida, menos prolífica y "malgasta" al 50% de la población, los machos, que no sirven para desarrollar embriones. Por otro lado el hecho de tener que ser "activo" en la búsqueda de la pareja requiere un mayor consumo energético. Pero la realidad es que, a pesar de estos problemas, la reproducción sexuada tendría sus ventajas, puesto que se dio el paso y además ha permanecido hasta el día de hoy. Veamos cuáles pudieron ser esas excelencias, adicionales y complementarias a la que nos explicaba el profesor Bryan Sykes unos párrafos más arriba.

Está claro que con la reproducción sexuada se obtiene una ventaja biológica al favorecer la variación genética entre los miembros de una especie, ya que la descendencia es el producto de los genes aportados por ambos progenitores en vez de ser una copia clónica de uno de ellos. Además, cuanto mayor es la variabilidad genética de una población, mayor es su tasa de evolución –simplemente por cuestión de número de genes capaces de mutar- y por tanto su

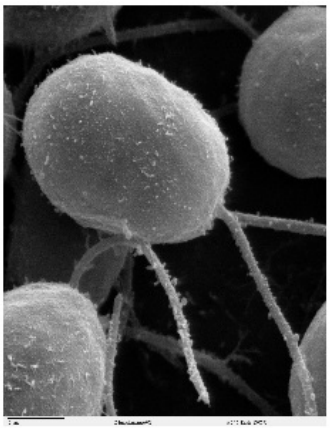
capacidad para protegerse frente a posibles cambios en su entorno: si estos le fueran adversos, es más fácil que pueda existir al menos un grupo minoritario que consiga protegerse genéticamente, extendiendo esta ventaja adquirida al resto de la población que saldría así favorecida. Por el contrario, si la mutación no es beneficiosa, esta quedaría aislada en un grupo acotado de población, cuyos individuos tendrían serios problemas para sobrevivir, y por tanto se reproducirían menos o probablemente nunca, con lo que desaparecería el gen mutado en el acervo genético de la población total. La conclusión es que la reproducción sexual permite proteger las mutaciones beneficiosas y hacer desaparecer las dañinas más rápidamente. Un factor más que favorecía su implantación.

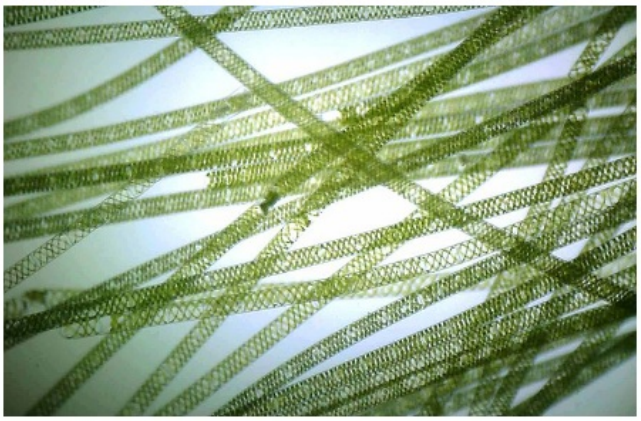
El camino hacia una reproducción sexuada

No se sabe muy bien cómo y cuándo la Vida comenzó a descubrir las grandes ventajas de la reproducción sexuada. No debió ser con la conocida y primitiva *Grypania spiralis* de hace 2.100 millones de años, aunque sí posiblemente con algún organismo intermedio entre los acritarcos, que pensamos fueron algo parecido a esporas, y los primeros fósiles conocidos de eucariotas: una larga temporada que abarca entre hace 1.800 y 1.200 millones de años. De hecho el organismo más antiguo conocido con reproducción sexual es el alga roja *Bangiomorpha pubescebs* en cuyos fósiles de hace 1.200 millones de años se distinguen perfectamente los dos sexos. Una vez más podemos hacer conjeturas sobre cómo debió ser el proceso del cambio basándonos en lo que podemos observar en la actualidad, estudiando las estrategias reproductivas de diversos seres unicelulares vivos, como las de las algas.

Las algas verdes más sencillas se reproducen por simple división celular mientras que las más complejas han transformado alguna de sus células vegetativas en reproductoras, llamadas **zoosporas**. Éstas disponen de unos flagelos que les permiten expandirse con mayor facilidad. En ambos casos la reproducción es aún asexuada.

El siguiente paso hacia la reproducción sexuada más compleja la podemos imaginar en la *Chlamydomonas*, un alga **unicelular** protegida por una gruesa pared celular. Ésta ha optado por aunar dos caminos reproductores: la simple división celular que produce clones de la madre, o también su **transformación en gametos** semejantes a las zoosporas. Estos gametos se aparean apareciendo al final del proceso una nueva especie de espora, con gran resistencia a las inclemencias ambientales. Estas "esporas" fructifican en condiciones óptimas, dando vida a varias algas. Se ha añadido un escalón de complejidad, al haberse incorporado al proceso la fusión de dos gametos prácticamente iguales.





A la izquierda Chlamydomonas (Wikimedia, dominio público) y a la derecha Spirogyra (Wikimedia, GFDL 1.2)

Algo parecido al anterior tipo de reproducción sexuada de un alga unicelular se repite en algas **pluricelulares**, como las filamentosas *Spirogyra.* En ellas se unen una **célula cualquiera** de un filamento con otra cualquiera de otro filamento dando un gameto que más tarde desarrollará otro nuevo filamento.

Pero en otras algas filamentosas el proceso ha dado un nuevo paso por el que a partir de células normales se generan unas **células intermedias especializadas** semejantes a los gametos de la *Spirogyra*. Es el caso del alga *Ulothrix.*

Un tercer paso en el desarrollo de la reproducción sexual se da cuando las **dos células especializadas** que se unen para dar un

cigoto son de **distinta configuración y tamaño**. Es el caso de otra alga filamentosa, el *Oedogonium,* en la que una célula grande, inmóvil y cargada de alimento se une a otra pequeña y móvil (gametos femenino y masculino respectivamente) para dar una especie de espora resistente.



Oedogonium mostrando un oogonio femenino (células hinchadas) y anteridios masculinos (células cortas apiladas) (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

En muchas plantas con sexos diferenciados aún continúa la alternancia de reproducción sexuada por gametos masculinos y femeninos con la asexuada por esporas -o semillas-. En este caso la reproducción sexuada permite a la especie el afianzar su dominio sobre el territorio previamente colonizado durante la fase asexual. Como ejemplo aclaratorio pensemos en las flores de las angiospermas con sus pistilos y ovarios en donde se producen, durante la parte sexuada del ciclo reproductivo, las células haploides, polen y óvulo, para en el mismo elemento estructural engendrar por fecundación las semillas diploides -en otras plantas esporas haploides- de las que se generarán nuevos individuos durante la parte asexuada del ciclo reproductor.

Tenemos que comentar un último refinamiento evolutivo manifestado en el hecho de que los propios organismos separaron su fenotipo por sexos acomodándose en cada uno de ellos sus formas y funciones a las diferentes estrategias, ya comentadas más arriba, de sus gametos específicos: los grandes, energéticos, escasos y sedentarios óvulos en los femeninos y los pequeños, abundantes y móviles gametos masculinos.

Recopilemos

El éxito del descubrimiento del núcleo celular, con su carga genética en los cromosomas, así como el de la reproducción sexuada, ampliaron en gran medida el abanico de la biodiversidad, tanto en variedad como en velocidad. Sin la reproducción sexuada posiblemente el mundo sería al cien por cien propiedad de las bacterias. Se abrió camino a una de las vías más potentes de renovación del acervo genético de los organismos vivos. Se sumó a los mecanismos que funcionaban hasta entonces, que en gran medida se centraban por un lado en los errores de la replicación del ADN, o bien en las mutaciones genéticas por acción de agentes externos, o en el intercambio horizontal de genes, que siguen practicando las bacterias hoy en día, o en un cuarto proceso que consistía en la acumulación masiva de genoma por simbiogénesis. Con la reproducción sexuada la baraja completaba un quinto palo para jugar la partida de la selección natural.

Todo comenzó en el Proterozoico, y por eso corresponde a este capítulo el que abandonemos por un momento la línea histórica del desarrollo de la Vida, para cumplir con la lógica curiosidad de *qué es eso de la herencia, y cómo funciona*. Es, pues, el momento de desvelar que son esas cosas de las que hemos hablado tanto sin presentarlas: hay que hablar ya de los genes, de las replicaciones de ADN, del proceso de traducción a proteínas, de los intrones, de la herencia, de las mitosis y las meiosis, del entrecruzamiento cromosómico, del código genético… realmente al escribir todas estas últimas frases veo que queda por aclarar mucha de la materia enunciada.

En el próximo capítulo iremos sin más a por la teoría genética.

NOTAS DEL CAPÍTULO 12:

1. Teoría propuesta en esta publicación de ScienceDirect de septiembre de 1972. "*The origin and evolution of gamete dimorphism and the male-female phenomenon*", G.A. Parker.

13. La genética

En el capítulo anterior habíamos dejado a las células eucariotas que habían aprendido una habilidad que con el tiempo les iba a abrir un mundo de desarrollo y complejidad: la reproducción sexuada. En este capítulo vamos a darnos un paseo por un campo teórico de la Vida. No hablaremos de organismos en particular, ni de habitantes de la biosfera, sino de algo compartido por todos, desde las bacterias a los elefantes africanos, pasando por las libélulas o las estrellas de mar: hablaremos de la genética.

La genética

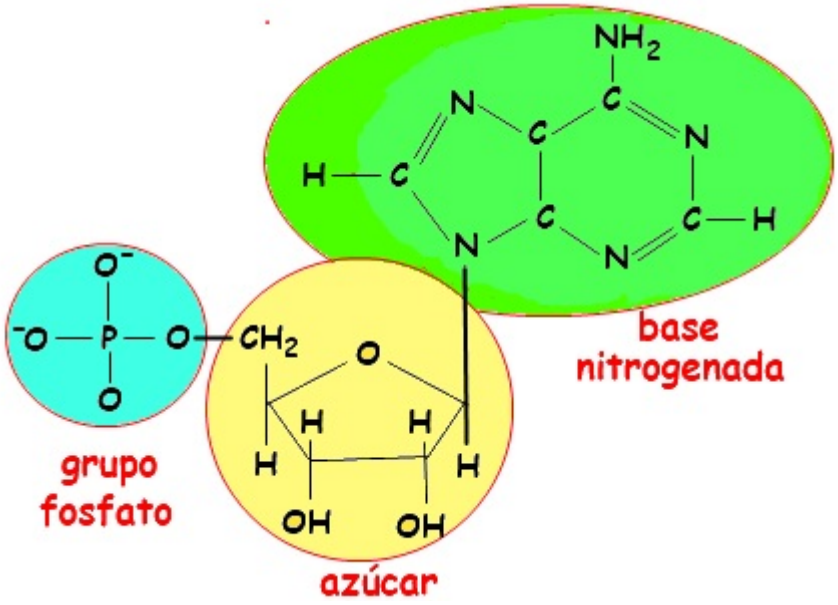
No entenderíamos el proceso de la herencia si no profundizáramos antes en los mecanismos básicos de la genética: qué es un gen, como actúa el ADN, cuál es el diccionario universal para interpretar a los genes, etc…

El **genotipo** es la totalidad de la información genética que posee un organismo, que conjuntamente con el medio ambiente determina la forma de ser tanto física como de conducta de un individuo. Ya sabemos que no sólo se encuentra en los núcleos celulares de las eucariotas o en el nucleoide de las procariotas, sino también en otros orgánulos celulares como los ribosomas, las mitocondrias o los cloroplastos. Es un compendio de la historia evolutiva de cada individuo. Hay una parte de él que tiene una antigüedad de más de 3.500 millones de años, que le ha sido transmitida a través de millones de antecesores, y otra parte nueva, que es exclusiva de cada uno de ellos.

La información del genotipo se esconde en el ADN, y más concretamente en los **genes,** y se transmite mediante la herencia a la descendencia.

Pero ¿qué son los genes?

El **ADN** es el **Á**cido **D**esoxirribo**N**ucleico. Es el tipo de molécula más compleja que se conoce, formada por una larga secuencia de nucleótidos, que contiene la información necesaria para poder controlar el metabolismo y la herencia en un ser vivo. El ADN es, en definitiva, el "sancta sanctorum" donde reside su información genética.

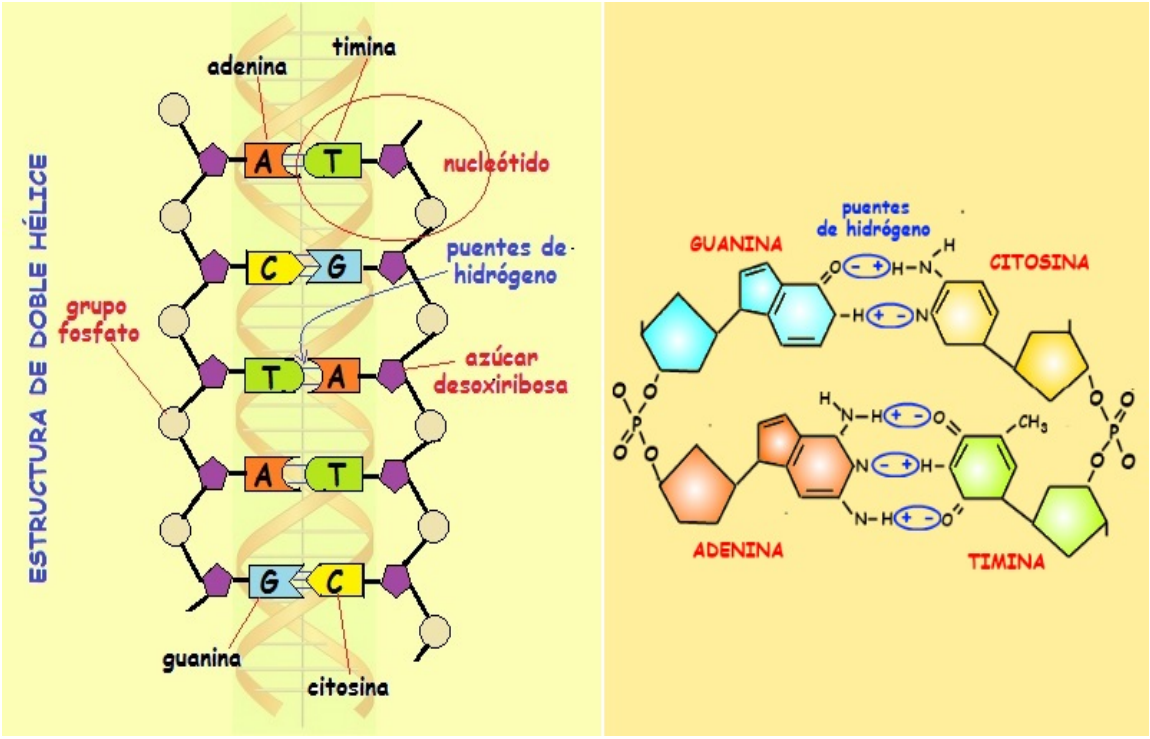


El nucleótido correspondiente a la base nitrogenada Adenina

Los **nucleótidos** son moléculas orgánicas formadas por la unión de un azúcar de cinco carbonos, una base nitrogenada y un grupo fosfato. En el ADN el azúcar es la desoxirribosa y las bases nitrogenadas son de cuatro tipos: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). Las cadenas del ARN son ligeramente diferentes ya que cambian el azúcar, que ahora es la ribosa, y la timina que pasa a uracilo (U). Tanto en el ADN como en el ARN los nucleótidos se unen entre sí mediante sus grupos fosfato.

Los nucleótidos son capaces de emparejarse mediante enlaces por puentes de hidrógeno [1], siempre de la misma forma y siempre **A**denina-**C**itosina y **G**uanina-**T**imina. Y no puede ser de otra manera por estrictas razones físicas de la *configuración geométrica* de sus moléculas. Las parejas de nucleótidos *-parejas de bases-* así

conformadas se unen ahora entre sí a través de sus grupos fosfato. En la figura de más abajo se pueden ver ambos tipos de enlaces, los puentes de hidrógeno como una mera unión por aproximación de cargas negativas y positivas y el segundo como un enlace fosfodiéster.[2] En esta reacción se libera una molécula de agua y se forma un dinucleótido. en donde sí se comparten orbitales electrónicos entre moléculas.



La cadena helicoidal del ADN y detalle de los dos tipos de enlaces que le dan cohesión

Esta sencilla estructura se repite formando un largo polímero que se "retuerce" adoptando la forma de una doble cadena helicoidal que mide de 2,2 a 2,6 nanómetros (un nanómetro equivale a 10^{-9} metros) de ancho, mientras que un nucleótido tiene una longitud de 0,33 nanómetros. Aunque cada unidad individual de la hélice es muy pequeña, los polímeros de ADN pueden ser moléculas enormes que contienen millones de nucleótidos. Por ejemplo, el cromosoma humano más largo, el cromosoma número 1, tiene aproximadamente 250 millones de pares de bases. También se sabe que en algunos casos el ADN puede adoptar una configuración de cuatro hebras: "cuádruple hélice".

Esta doble hélice, con la ayuda de ciertas proteínas llamadas histonas, se enmadeja y se empaqueta hasta formar la cromatina en la situación habitual de la célula o como cromosomas cuando está en proceso de mitosis. La cromatina adopta una forma de fibras enrolladas que pueden variar en su grado de compactación. En su estado más laxo (eucromatina), se ve como una fibra delgada y dispersa, lo que permite el acceso al ADN para la transcripción. En su estado más compacto (heterocromatina), se enrolla de forma más densa y apretada, haciendo que el ADN sea menos accesible. Las dos formas de cromatina no son excluyentes, sino que coexisten dentro del núcleo de una misma célula.

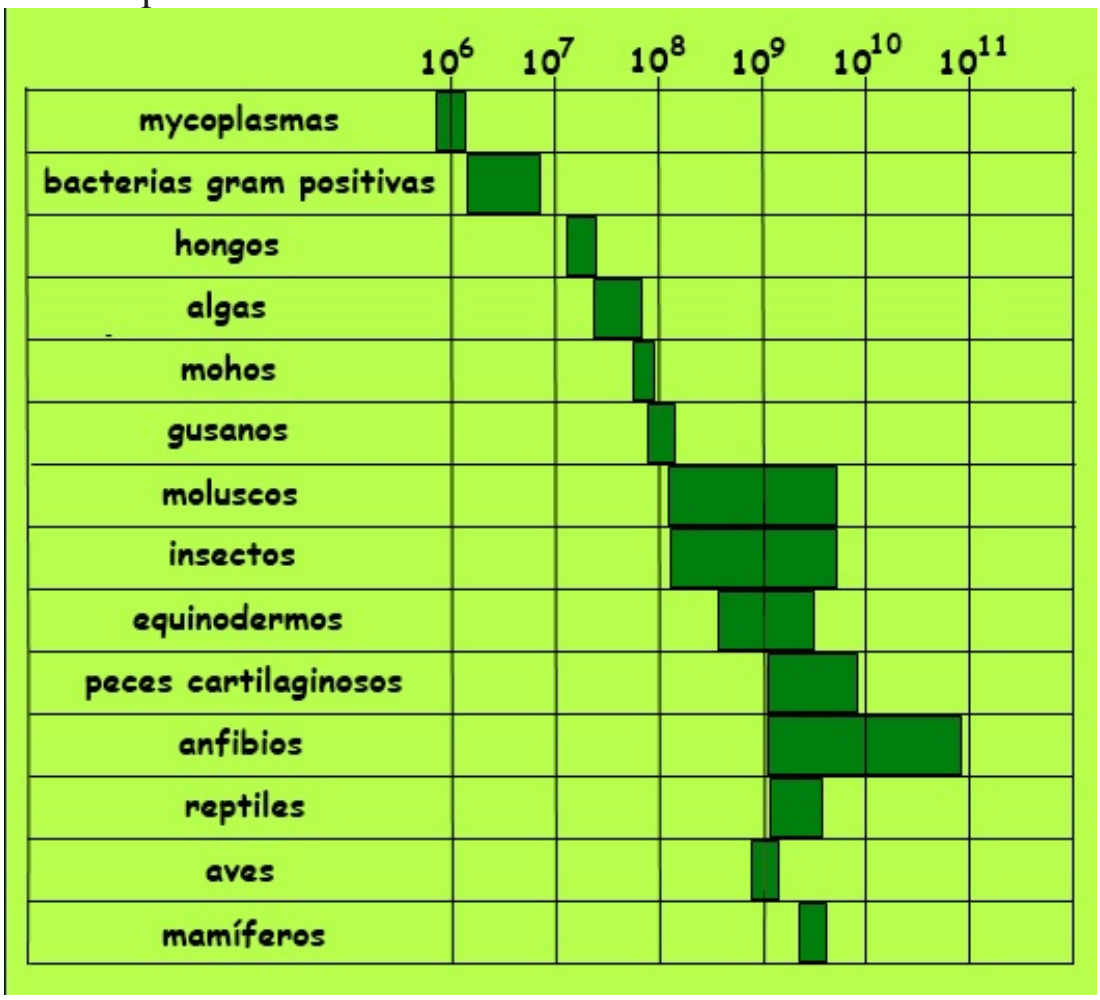
Los biólogos James Watson y Francis Crick fueron los que en 1953 propusieron la estructura helicoidal para esta molécula, por lo que recibieron el premio Nobel de Medicina en 1962. A decir verdad ellos culminaron el trabajo de muchos científicos anteriores, desde el español y también premio Nobel Severo Ochoa hasta la británica Rosalind Franklin que les dejó la solución en bandeja.

Un **gen** está constituido por una determinada sucesión de nucleótidos de la molécula de **ADN**. Esta secuencia de nucleótidos puede ser, por ejemplo, la AATGGCCGTTAG, y su pareja "cremallera" de la hélice del ADN, la TTACCGGCAATC. La disposición ordenada de las cuatro bases constituye una información "digital" necesaria para la síntesis de las proteínas, aunque también informa sobre diversos tipos de ARN, ya sea mensajero, ribosómico o de transferencia. Por este motivo la cantidad de información se suele dar en pares de bases.

No obstante, no toda la secuencia de pares de bases de la cadena es útil ya que unas partes codifican información (los **exones**) y otras no (los **intrones**). No se sabe muy bien el porqué de la ausencia de funcionalidad de estos últimos, aunque al hablar de la aparición del núcleo celular en el capítulo 11, "*Aparecen las células eucariotas*", ya planteamos una teoría de su existencia y función. De esta forma, un gen consistiría en una serie de exones entre los que se intercalan uno o varios intrones no codificantes. Hoy sabemos que cerca del

30% del ADN de las eucariotas está formado por intrones, mientras que las procariotas carecen de ellos.

Pero volvamos al genoma. La longitud del ADN es **diferente para cada especie**, de forma que incluso especies parecidas tienen cantidades de ADN muy diferentes entre sí, como se puede ver en la figura siguiente. El del hombre tiene unos 3.200 millones de pares, es decir, incorpora una información equivalente a 60.000 entradas como ésta que estás leyendo si cada par equivaliera a una letra, en los que se encuentra escrito todo el historial evolutivo de nuestra especie.



Longitud del genoma en pares de bases

Ahora bien, lo realmente significativo es el número de genes diferentes, ya que ello define en principio el potencial químico del ADN. El arroz tiene unos 50.000 genes, la mosca 13.700 y el

hombre 27.000. Produce sorpresa la comparación entre el arroz y el hombre, aunque se cree que los genes humanos son más eficientes. El tamaño del genoma del *Trillium*, planta de la familia de los lirios, es más de 20 veces el de la planta del guisante y 30 veces el de los humanos. Algunas amebas unicelulares tienen un genoma 200 veces el tamaño del genoma humano. Estas incongruencias, que se conoce como la paradoja del valor C, pueden explicarse por la existencia del ADN no codificante, del que hablaremos unos pocos párrafos más adelante.

En la figura anterior hemos visto cómo a medida que se va avanzando en la escala evolutiva, parece como si el genoma tendiera generalmente a hacerse mayor. Aunque no es una regla perfecta entre familias sí lo es entre las especies dentro de una misma familia. Pero ¿cómo sucedió esto? ¿Cómo pudo ser que los antiguos ácidos nucleicos alargaran sus cadenas?

En el capítulo 11, "*Aparecen las células eucariotas*", donde hablábamos de la "teoría del hidrógeno" de Martin y Müller, ya comentamos la aportación de las mitocondrias al ADN de sus hospedadoras. Ésta fue una vía, aunque también hay otras teorías.

Como la que explicaba ya en 1985 el biólogo Thomas Cavalier-Smith partiendo de la realidad apuntada un par de párrafos antes: un organismo más evolucionado desarrolla un metabolismo más complejo, que simplemente requiere un mayor espacio donde llevar a cabo su química, lo que al final supone una célula mayor. Como hay una correlación entre la actuación del ARN ribosómico en el citoplasma celular -en donde se fabrican las proteínas- y el ARN que transcribe el ADN en el núcleo, es preciso un núcleo más grande en una célula más grande. El proceso de mitosis (hablaremos de este tipo de división celular un poco más abajo) de un núcleo más grande, con sus estructuras de microtúbulos, centriolos y husos, pudo requerir cromosomas más largos. Esto no suponía un mayor número de genes, ya que se necesitaban los que se necesitaban. Así que el ADN creció duplicando y duplicando largas porciones de su cadena molecular. Es un hecho que casi **la**

mitad del ADN de las células eucariotas consiste en secuencias de nucleótidos que **se repiten** centenares o miles de veces.

Pudo ser consecuencia de este desmedido crecimiento el que en las células eucariotas exista un exceso de ADN que no expresa directamente proteínas, el llamado ADN no codificante, del que sólo ahora empieza a conocerse algunas de sus funciones. En la especie humana **sólo del 1 al 2 %** del ADN son genes codificantes. En las células procariotas, sin embargo, se usa casi todo el ADN.

¿ADN basura?

Hasta hace poco al ADN no codificante se le llamaba ADN "basura", ya que se suponía que no desarrollaba ninguna función y, como hemos dicho, era el resultado de antiguas duplicaciones en la cadena del ADN y restos de genes desactivados. Sin embargo, en los últimos años está ganando fuerza la teoría de que todo ese material genético no codificante **sí debe tener alguna funcionalidad**, como pudiera ser el dotar al ADN de su forma y estabilidad fisicoquímica, o bien ejercer una función reguladora controlando el nivel de expresión génica, entre otras. En 2003 se inició el proyecto ENCODE (**ENC**yclopedia **O**f **D**NA **E**lements) [3] que pretendía constituirse en una completa enciclopedia del ADN. Los estudios desarrollados han llegado a conclusiones que echan por tierra el concepto del *ADN basura* al concluir que por lo menos el 80% de la cadena de ADN considerada como "no codificante" tiene actividad biológica y hace que el ADN codificante se exprese, se active o se silencie. Es como si fuese un gran panel de control con millones de interruptores, que según se posicionen alteran el resultado final de la expresión de los genes "activos". Es decir, que estos no funcionan de forma individual bajo el lema "un gen-una proteína", sino que todo quedaría en manos de redes extensas de interacción entre grupos de genes.

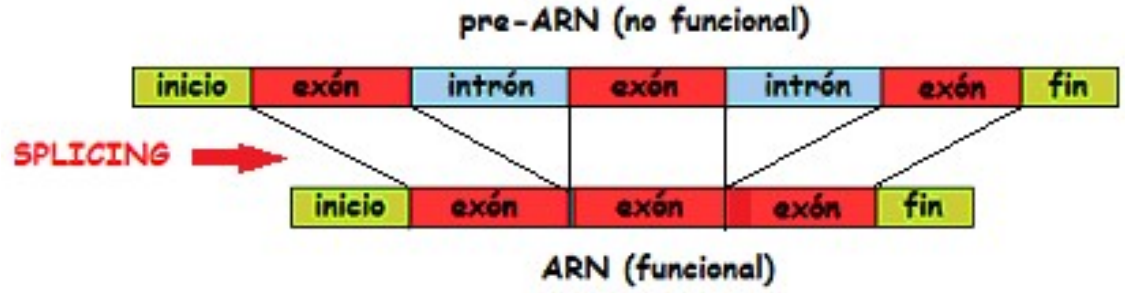
De todas formas no debería extrañarnos la existencia del ADN "basura", ya que debe ser consecuencia casi espontánea de la evolución. El comportamiento general de ésta no es que se

corresponda ciertamente con algo ordenado, perfectamente diseñado en todos sus detalles y eficiente; al contrario, se comporta casi como una gran chapuza de recorta y pega. Los fenómenos de degeneración de algún gen y consiguiente pérdida de su funcionalidad, así como la inmersión de virus en las cadenas del ADN es una realidad que se ha venido produciendo a lo largo de toda nuestra historia genética. Y el hecho de que todas estas "imperfecciones" no hayan sido lavadas se debe en parte a que no son perjudiciales, no hacen daño en el funcionamiento metabólico, y tocarlas sin necesidad supone un riesgo de desequilibrio. Y en otra gran parte a que es pieza de una estrategia de diversidad, agilidad y duplicidades de soluciones: el "desorden" en la regulación y expresión génica no es un error sino un recurso evolutivo clave para la versatilidad, rapidez de respuesta y complejidad funcional en organismos superiores.

Porque la "indiferencia" de la evolución también tiene ventajas. A mayor longitud (¿mayor porcentaje de ADN basura?) mayores son las oportunidades. Cualquier modificación "indiferente" en la cadena de nucleótidos que conforman el ADN entra a formar parte en el acervo genético con futuribles. En el entorno ambiental del momento de la alteración la mutación se manifiesta como irrelevante. Pero en un entorno cambiante puede ser probable que en un futuro las nuevas condiciones medio ambientales den una oportunidad a un gen hace mucho tiempo mutado, incluidos los de la cadena de ADN no codificante, un gen que lleva consigo lo que en las nuevas circunstancias se manifiesta como una ventaja evolutiva. De esta manera podemos generalizar que a mayor longitud del ADN "basura" mayor es el número de mutaciones "indiferentes" que alberga y a la vez mayor es el número de oportunidades durmientes a la espera de activarse cuando el medio reconozca su ventaja. Quién sabe si esta pueda ser la defensa futura frente a enfermedades hoy en día incurables ¿Por qué hay individuos que no desarrollan una enfermedad aunque estén contagiados con el patógeno que la produce? Tengo que reconocer que esto último es una mera especulación mía pero bien pudiera ser.

La expresión génica es algo endiabladamente complejo

En los organismos eucariotas las secuencias codificadoras de exones dentro de un gen normalmente no son continuas, sino que están interrumpidas por las secuencias no codificadoras de intrones. Cuanto más evolucionada es una especie más cantidad de intrones tiene. Cuando se ha de codificar una proteína o un ARN, los intrones deben desacoplarse, y sabemos que lo hacen dentro del núcleo, para que la cadena de exones se reúna después antes de empezar su trabajo. Todo ello constituye lo que llamamos ***splicing, el empalme alternativo***. Es, efectivamente, una fuente de posibles errores y cambios, aunque también es una fuente de versatilidad.

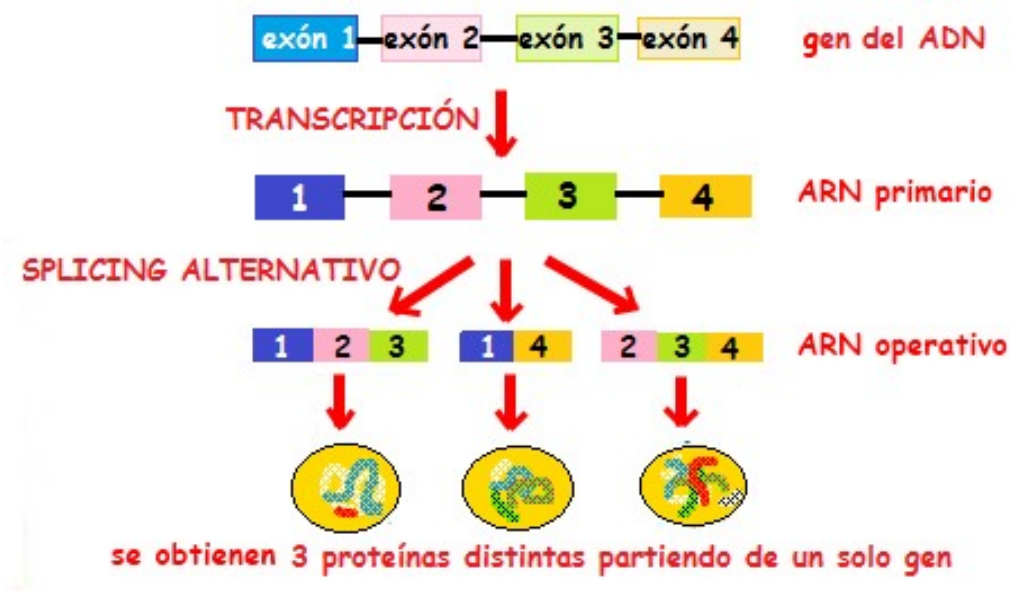


Transcripción de la secuencia codificadora del gen del ADN al ARN mensajero

Durante el proceso de *splicing* pueden producirse distintas alternativas de combinación de los exones -***splicing alternativo***-, de tal manera que a partir del mismo pre-ARN mensajero pueden obtenerse diferentes proteínas (ver figura anterior). De esta forma, la cantidad y variabilidad de proteínas posibles aumenta considerablemente sin que lo tenga que hacer el número de genes. De hecho, se calcula que en el ser humano cerca del 50% de transcritos primarios son susceptibles de sufrir *splicing* alternativo. Llegando al caso extremo hoy por hoy conocido, el del gen Dscam de *Drosophila*, que presenta 38.000 variantes de *splicing*, y por tanto de proteínas subproducto, un número mayor que el del total de sus genes.

Lo anterior refuerza las conclusiones del ENCODE y pone patas arriba la idea, casi ley, de que a cada gen le corresponde una

proteína. Las particularidades del proceso de expresión de los genes que exponemos a continuación ayudarán a reforzar el entendimiento del concepto anterior.



Esquema del funcionamiento del splicing alternativo, mediante el cual un mismo gen puede expresar diversas proteínas distintas

Tanto en procariotas como en eucariotas, al comienzo de la secuencia codificante de un gen aparece una sección de ADN denominada **promotor**, que es capaz de activar o desactivar la transcripción del gen, proceso que suele estar mediado por proteínas específicas llamadas **factores de transcripción**. Incluso los propios intrones participantes en el *splicing* pueden realizar estas funciones de regulación. *Este proceso es como poner una llave en la cerradura y abrir la puerta* (aunque la realidad no es tan mecánica).

Pero hay otra modalidad de expresión de genes por la que *se abre la puerta con un mando a distancia*. Es otro tipo de mecanismo de control que está constituido por los **interruptores genéticos** que son estructuras distintas a los promotores y que están constituidos por dos elementos: los **potenciadores** y los **factores de transcripción**. Un potenciador, o intensificador, es un fragmento de la propia cadena de ADN no codificante, que puede encontrarse

cerca del gen o alejado de él -incluso a miles de nucleótidos de distancia- y que presenta unos lugares específicos de unión física para los factores de transcripción. Cuando los factores de transcripción se unen al potenciador, el gen se «activa», produciéndose la transcripción. Los potenciadores son como un cerrojo wifi en donde tiene que entrar una llave determinada para que la trascripción tenga lugar.

Lo que parece tan sencillo tiene una segunda derivada decisiva para el organismo. Los factores de transcripción no dejan de ser unas proteínas más que requieren en su "fabricación" la acción de más genes. Con lo cual deberemos plantearnos la siguiente pregunta **¿quién regula a su vez los factores de transcripción?** No debe resultar sorprendente el que al perseguir fisiológicamente este tema lleguemos a causas que encontramos, entre otros, en la situación química del medio citoplasmático, o en la influencia de las neuronas vecinas, o en los niveles hormonales que a permean todo el cuerpo, o incluso ¡lo que está sucediendo fuera de él, en su exterior![4] es decir, en el **ambiente** donde se encuentra inmersa la neurona: **los genes no completan su sentido si nos olvidamos del contexto del ambiente en donde se expresan**. Realmente se observa que cuanto más complejo genómicamente es un organismo, mayor es el porcentaje del genoma dedicado a la regulación génica a cargo del ambiente. Lo que nos conecta con lo que habíamos dicho más arriba acerca de la capacidad codificadora de genes que encontramos en el ADN "basura".

Pero los procesos reguladores se nos complican más al saber de la "plasticidad" de las proteínas y sus tendencias "promiscuas". Las proteínas no siempre son rígidas ni exclusivas: pueden cambiar de forma (plasticidad) lo que les facilita el tener múltiples y evanescentes interacciones (promiscuidad) según las circunstancias, lo que les da versatilidad funcional y un papel clave en la complejidad biológica. La plasticidad les permite adaptarse a diferentes entornos o condiciones celulares, a interactuar con múltiples moléculas o a cambiar su actividad según el contexto; mientras que la promiscuidad les es útil para ahorrar recursos

celulares, favorecer la evolución de nuevas funciones o participar en redes de señalización complejas[5]. A diferencia de las proteínas rígidas que tienen una única forma funcional, muchas proteínas pueden "moldearse" dinámicamente. Esto es especialmente importante en procesos como la señalización celular (la "conversación" entre células), el reconocimiento molecular (la "conversación" entre moléculas), la catálisis enzimática o la respuesta al estrés. Esta flexibilidad les permite cumplir diversas funciones sin necesidad de cambiar su secuencia de aminoácidos. Es una propiedad crucial para la adaptación y la regulación biológica. Un ejemplo lo tenemos en la proteína p53 supresora de tumores. Su estructura es flexible y se reorganiza para interactuar con diferentes tipos de ADN, proteínas reguladoras y otros cofactores. Según el tipo de daño celular o señal externa, p53 adopta distintas conformaciones que determinan si la célula debe detenerse, repararse o entrar en apoptosis (muerte celular programada).

Algo semejante lo encontramos en la promiscuidad de las proteínas, que es la versátil capacidad funcional que tienen algunas de ellas -especialmente enzimas y proteínas reguladoras- para interactuar con múltiples socios moleculares o catalizar más de una reacción diferente. Esta promiscuidad no es un error del sistema sino una característica evolutivamente ventajosa, ya que permite eficiencia, reutilización funcional y mayor adaptabilidad en entornos cambiantes. Encontramos un ejemplo en citocromo P450, una familia altamente promiscua de enzimas presente en casi todos los organismos. Son capaces de reconocer y metabolizar una gran variedad de sustratos con estructuras químicas muy distintas. lo que se revela fundamental en el hígado humano, donde permite que el cuerpo procese y elimine múltiples sustancias sin necesidad de tener una enzima distinta para cada una.

Lo ampliamos. En el interior de la célula muchas proteínas no actúan de forma aislada sino que tienden a agruparse en conglomerados temporales que se forman y disuelven según las necesidades funcionales del momento. A diferencia de los

complejos proteicos estables que tienen una estructura fija y función constante, estos conglomerados, también llamados condensados biomoleculares, son dinámicos y reversibles. Se comportan como gotas líquidas sin membrana, concentrando proteínas, ARN y otras moléculas específicas en espacios reducidos dentro del citoplasma o del núcleo. Los componentes de estos conglomerados entran y salen continuamente de la gota, lo que permite una renovación constante y una gran flexibilidad funcional. Esta dinamicidad es esencial para que la célula pueda adaptarse rápidamente a cambios internos o señales externas. Por ejemplo, en situaciones de estrés se forman ciertos condensados para secuestrar proteínas o ARN y protegerlos hasta que las condiciones vuelvan a ser favorables. Y en particular, en el núcleo se generan algún tipo de esos conglomerados que regulan la expresión génica, ensamblándose cerca de determinados genes para activar o silenciar su transcripción, y luego desapareciendo cuando ya no se necesitan. ¿Cómo lo consiguen? es materia aun no muy conocida.

Para completar la nómina de "perturbaciones" genéticas hay que comentar también las que introduce la cromatina. La plasticidad de la cromatina -su capacidad de cambiar entre estados más abiertos (eucromatina) o compactos (heterocromatina)- es clave para la regulación de la expresión génica, porque determina qué regiones del ADN están accesibles para ser leídas y transcritas. Cuando la cromatina se relaja, los factores de transcripción y la maquinaria celular pueden acceder al ADN, lo que favorece la activación de genes. En cambio, cuando se condensa, el ADN queda "oculto" y los genes en esa región suelen estar silenciados. Pero es que además se presta a modificaciones puntuales, esporádicas y temporales gracias a las que la expresión génica se adapta a diferentes funciones, tiempos y entornos. Por ejemplo, la reconfigura de la cromatina abre en la célula regiones de genes específicos necesarios para su nueva función o cierra otras regiones que ya no necesita, es decir, que células con el mismo ADN puedan expresar genes distintos según su identidad.

Lo descrito hasta ahora nos permite entender cómo muchos genes tienen expresiones de lo más variopintas y nada específicas, provocadas por iniciadores y causas muy diversas. A la casuística de tener más de un potenciador y por lo tanto más de un «interruptor» que en buena medida depende del ambiente, se le añade la aleatoria diversidad que permite el *splicing*, o el difuso (por lo aun desconocido para nosotros) comportamiento de las especiales "habilidades" de las proteínas celulares o la versatilidad estructural de la cromatina… entre otras mil cosas sabidas y aun no entendidas. Esto permite que un único gen juegue su papel en distintos momentos, cuándo, y lugares del desarrollo del organismo, dónde, existiendo un control independiente para cada uno de ellos. Es como si los genes fueran una especie de subrutinas estándares dentro del software del ADN,[6] a las que se acude cuando un programa más general requiere de su intervención. El ADN se comporta más como una caja de herramientas (genes) que como un ente con algún tipo de entes con una agencia precisa.

También sabemos que la regulación génica no está exclusivamente en manos de las proteínas sino también en las de cadenas de ARN regulador no codificante, expresadas por los propios genes. La regulación génica por ARN's largos y cortos no codificantes es un mecanismo esencial que complementa y afina la expresión de los genes más allá del control directo del ADN. Y aunque no codifican proteínas, estos ARN cumplen funciones reguladoras potentes, actuando a distintos niveles del proceso génico. Los ARN de cadena corta no codificantes Incluyen principalmente los microARN (miARN) y los siARN (ARN pequeños de interferencia). Son moléculas de unos 20-25 nucleótidos que regulan la expresión post-transcripcionalmente, es decir, después de que el ARN mensajero (ARNm) ha sido producido. Mientras que los de cadena larga no codificantes, con más de 200 nucleótidos, ejercen una acción más diversa y menos comprendida que la de los ARN cortos. Pueden actuar en el núcleo o en el citoplasma y regulan la expresión génica de múltiples maneras: Modulando la estructura de la cromatina al reclutar proteínas que

activan o silencian genes; interfiriendo con la transcripción al unirse al ADN o al ARN en formación; o secuestrando proteínas reguladoras o miARN al actuar como "esponjas" moleculares.

La complejidad que hemos intentado poner de manifiesto en los párrafos anteriores remacha lo erróneo de la visión tradicional de "un gen: una proteína: una función". La regulación fisiológica es algo más, mucho más complejo. Parece como si la simple línea causal expuesta fuera mucho más rica, como si en cada nivel de complejidad biológico emergiera su propia dinámica causal autónoma que no precisara de la de niveles "inferiores" (o superiores), pero que convivieran a la vez sin ser excluyentes. Algo así como pasa en el mundo de la física en la que siendo el mismo dominio, la causalidad cuántica no tiene nada que ver con la causalidad química y esta con la biológica, aunque todas se necesiten. La emergencia de la causalidad en la regulación biológica surge de interacciones dinámicas, distribuidas y a múltiples niveles. En lugar de que un solo elemento dicte el resultado, es la red de relaciones entre genes, proteínas, metabolitos, señales y estructuras celulares la que genera comportamientos regulados y coherentes. Esta causalidad emergente no puede predecirse completamente a partir de las partes individuales, porque el todo tiene propiedades que van más allá de la suma de sus componentes. Por ejemplo, la diferenciación celular o la respuesta inmune no se explican únicamente por la presencia de ciertos genes, sino por cómo estos genes se activan o silencian en contextos específicos, influenciados por el entorno, la historia celular y otras señales. Vemos entonces como la biología moderna se está adentrando en una senda que deja atrás la idea de que la causalidad biológica es simple y jerárquica, al percatarse y reconocer que es compleja, contextual y emergente.

Como vemos, la expresión génica, y sus derivados aguas abajo, está configurado como un proceso complejo y sofisticado que permite que los organismos celulares alcancen fenotipos muy desarrollados. Pero no olvidemos sus inicios, que se remonta quizás en la simbiosis que creó las mitocondrias. Y con ellas los

transposones, los intrones, con su capacidad de autorrecorte. La célula reaccionó de muchas maneras para aplacar el problema, entre otras aplicando el *splicing* aprendido de los transposones a los trozos en que quedaban divididos sus genes, proceso por el que no solamente limpiaba y reconstruía la cadena completa de un gen inicial, sino que en el proceso se producirían además errores que formarían nuevos genes, los cuales a su vez expresarían nuevas proteínas. Inicialmente los errores podrían tener poco efecto, pero con el tiempo la nueva proteína podría asumir una función novedosa. Es sorprendente cómo de forma fortuita la deriva de las eucariotas para combatir a los intrones hizo a sus genes más versátiles y más capaces de apoyar nuevas estrategias evolutivas.

Hay que avanzar. Hasta aquí hemos definido qué es el genotipo, cómo son los genes y algunos mecanismos de activación del proceso de transcripción o de expresión proteínica. Pasemos a ver cuáles son los códigos secretos que traducen la información inmersa en las secuencias de nucleótidos de los genes de forma que se den las instrucciones precisas para sintetizar una proteína.

El código genético

Todo funciona gracias a un manual de contraseñas llamado **código genético.** Por su sencillez resulta brillante y elegante. Por su universalidad resulta abrumador: todos los seres vivos utilizan este manual de reglas secretas, desde la más humilde bacteria a una cactácea, desde un hongo al mamífero más complejo, todos utilizan el mismo manual de traducción. Este código es muy ancestral y prácticamente no ha sufrido cambios, lo que indica un origen único y universal. Realmente es una prueba casi concluyente del origen común de los individuos vivos, de la existencia de un ancestro común. Fuera cual fuera el detonador del origen de la Vida.

Todo está basado en los **codones** o grupos repetitivos de tres nucleótidos seguidos, y en un mismo orden, en la cadena de un

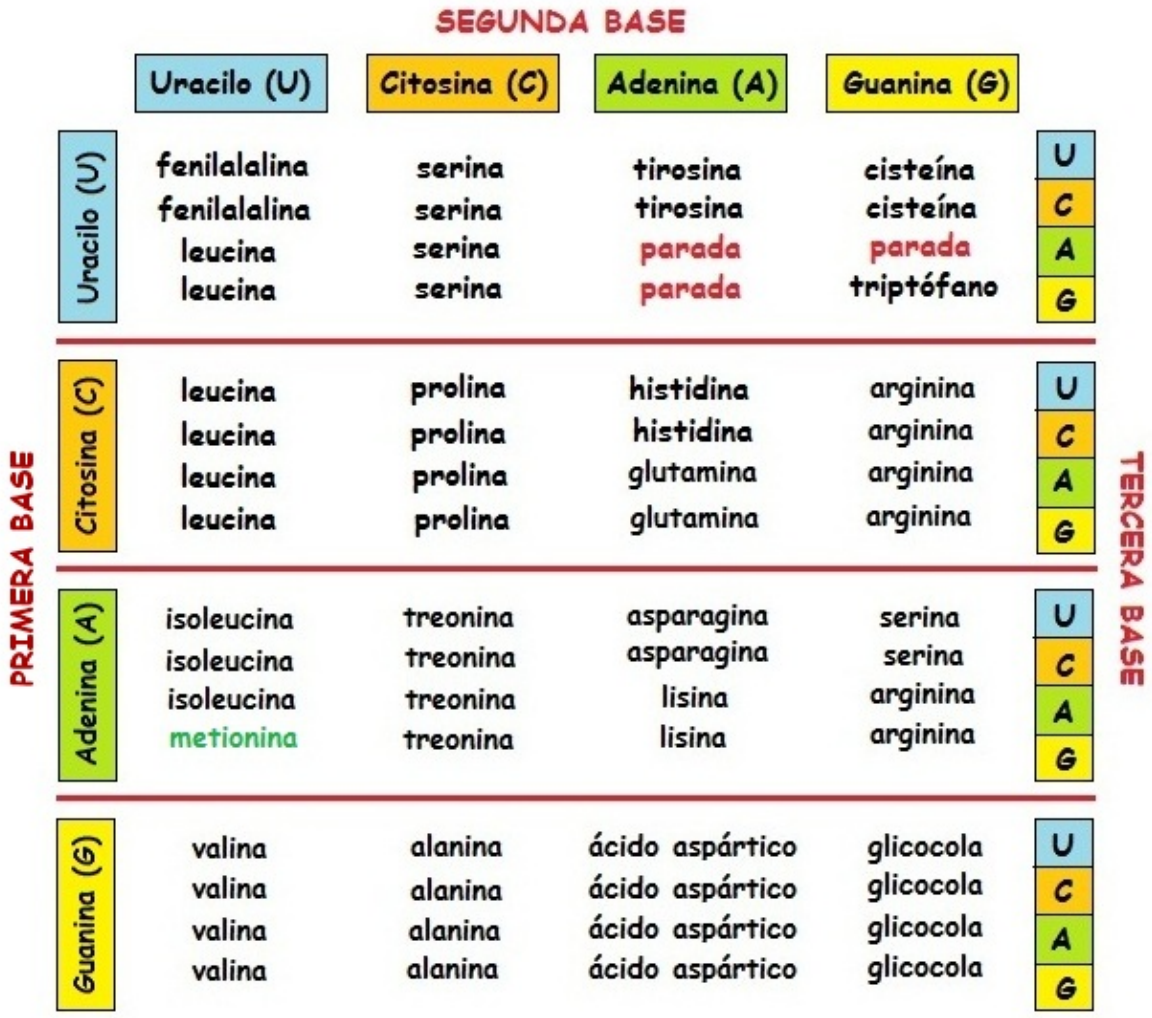
gen. Cada codón transcribe la orden de sintetizar uno de los 20 aminoácidos existentes en los organismos vivos.

Sabemos que cuatro son los nucleótidos formantes del ADN, adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C), y además el uracilo (U), que en el ARN sustituye a la timina. Si los agrupamos de tres en tres, con repetición, tendremos 64 (4^3) posibles ternas, 64 posibles codones. Dado que solamente se deben sintetizar 20 aminoácidos está claro que a un mismo aminoácido le puede corresponder más de un codón, pero nunca un mismo codón expresará más de un único aminoácido. A eso se le llama una relación "degenerada". Si no fuera así, la probabilidad de error en las traducciones que se realizan en los ribosomas sería muy elevada.

Hay tres ternas que codifican la orden de parada en el proceso de síntesis de la proteína. Y hay un codón, el AUG, que se corresponde con el aminoácido metionina, que codifica el inicio. Todos los procesos de traducción de una secuencia de nucleótidos en otra de aminoácidos comienzan por el reconocimiento del codón de iniciación. Así, todas las proteínas comenzaran por este aminoácido, AUG. De esta manera se asegura una correcta lectura de la secuencia de ternas de nucleótidos. El proceso termina cuando se llega a uno de los codones de parada.

Todo el proceso de síntesis de una proteína viene dirigido por un ARN mensajero (ARNm) y requiere una gran complejidad. Hay que recordar que el mensajero se crea por copia de un tramo de una de las cadenas de la hélice del ADN, siguiendo la regla de los pares homólogos de nucleótidos, G-C y A-U. Es lo que llamamos la **transcripción**. Una vez formado el ARN mensajero llega a los ribosomas, en donde se lleva a cabo físicamente la **traducción**, construyéndose así las proteínas según la secuencia de aminoácidos indicada por el mensajero y gracias a la aportación de los adecuados materiales –aminoácidos- que realiza un ARN de transferencia (ARNt). El ribosoma está constituido por otro tipo de

ARN, el ribosómico (ARNr), unido a una serie de proteínas específicas. Hablaremos de este proceso unos párrafos más abajo.



Código genético: en el centro los aminoácidos que expresan cada terna de nucleótidos

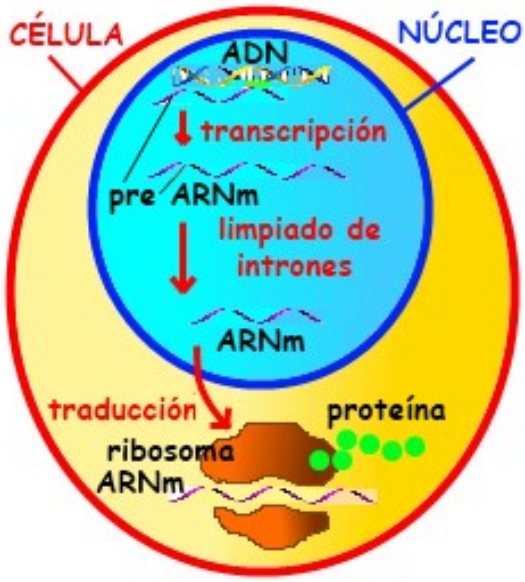
Hay diversas teorías sobre la aparición de este código mágico, que inicialmente debió ser muy ambiguo, aunque ninguna concluyente. Realmente su origen es una más de las piezas desconocidas del mundo prebiótico y de la aparición de la Vida.

Una de las teorías más reconocidas es la que explica el origen de cada uno de los tres nucleótidos del codón. La primera letra estaría relacionada con el precursor del aminoácido concreto que sintetiza. La segunda letra del codón estaría relacionada con la hidrofobia o filia del aminoácido. La tercera letra está "degenerada" y no

implicaría en principio ninguna información concreta. Pero dos posiciones, las dos primeras letras, a ocupar por cuatro letras –cuatro nucleótidos- da 16 posibilidades de información, lo que proporciona un potencial para expresar 15 aminoácidos más un codón de parada. Inicialmente, en los albores de la vida metabólica, sólo existirían 15 aminoácidos, que "compitieron" entre ellos por una tercera letra, como así parece que es en la realidad para los 15 aminoácidos más comunes. Los otros cinco aminoácidos posteriores -hasta los 20- tienen menos variación en la tercera posición, como el triptófano que sólo es secuenciado por un codón acabado en G. Esta tercera posición debió imponerse a través de mecanismos de selección natural, ya que se ha demostrado matemáticamente que la actual estructura del código genético es la que con mayor efectividad evita las posibles mutaciones y sus perjuicios: con ello se disminuirían, por un lado, los problemas de fidelidad en la replicación de la cadena ADN, al haberse diseñado codones con funciones similares, y por otro, los problemas de errores durante la traducción en el ribosoma, al interpretar varios codones distintos a aminoácidos semejantes. La distribución de la tercera letra tras las parejas iniciales fue como fabricar diversos comodines para una misma jugada, lo que habría dificultado el que sucedieran los errores.

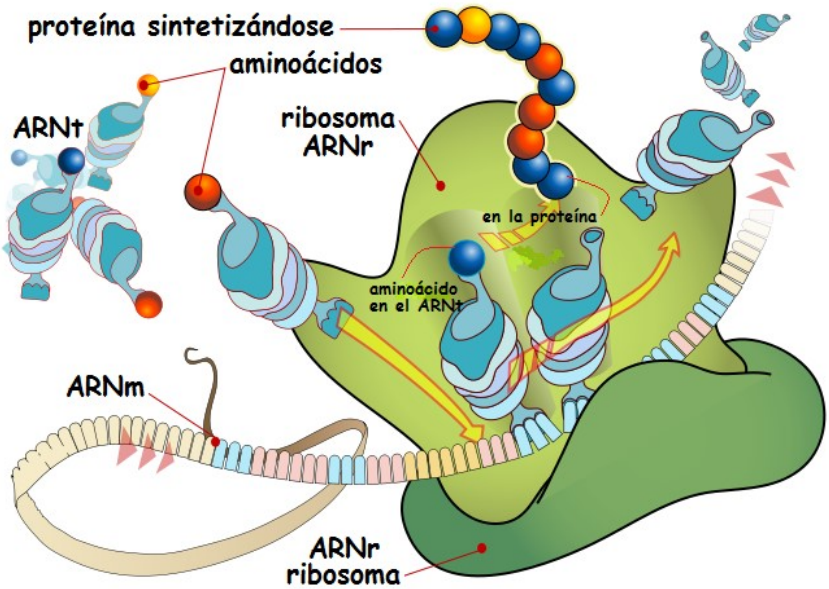
¿Cuál es el proceso que desde la información codificada en la doble hélice del ADN nos conduce hasta el abanico de funciones dirigidas por moléculas de proteínas?

En líneas generales, la información que contiene el ADN en sus secuencias de nucleótidos se **transcribe** a un ARN mensajero de acuerdo al código de emparejamientos. Para ello una enzima ARN-polimerasa crea algo semejante a una burbuja que aísla la porción de ADN que se va a duplicar y separa sus hélices. En este espacio se va a generar el ARNm por copia homóloga de una de las cadenas del ADN abierto. Si el nucleótido del ADN es la Adenina, el ARNm que se está montando como una cremallera incorporará en esta posición un Uracilo. Si es una Guanina el diente del ARN será una Citosina. Y así según los posibles emparejamientos.



Proceso general desde la información genética a la síntesis de una proteína. Aquí se observa cómo la membrana del núcleo separa físicamente la labor de los intrones de la síntesis de proteínas

El ARNm así formado se le conoce como "pre ARN" ya que hay que **procesarlo** y limpiarlo de intrones para dejarlo sólo con los exones, según un proceso explicado un poco más arriba. El ARNm resultante sale del núcleo y se dirige al ribosoma para el siguiente paso: la traducción.



Proceso de traducción en un ribosoma (Wikimedia, dominio público)

La **traducción** (ver el sentido de las flechas rosas de la figura siguiente) se realiza sobre el entramado de moléculas de ARNr ribosómico y proteínas que constituyen la estructura del ribosoma. El ARNm mensajero lleva las órdenes que son interpretadas por diversos ARN de transferencia, que, como disciplinados trabajadores, leen la instrucción de un codón y capturan el correspondiente aminoácido que incorporan a la cadena de la proteína que están fabricando.

Una posible explicación del inicio del software genético

En el mundo anterior al ARN los ácidos nucleicos, es decir, las moléculas equivalentes al ADN o ARN actual, debían ser del tipo de las ribozimas, una mezcla entre un "ácido **ribo**nucleico" y una "en**zima**". Podríamos decir por tanto que serían sencillas moléculas de ARN con *capacidad enzimática, incluso para autorreplicarse* cuando actuaban sobre ellas mismas. A partir de las ribozimas se llegó a las modernas proteínas.

El paso de las ribozimas a las proteínas enzimáticas fue un proceso gradual de evolución entre estos dos tipos de polímeros, al final del cual una proteína heredó no sólo la función genérica de enzima, sino destacaría en una muy concreta y particular equivalente a la que desarrollaba la ribozima madre, como podía ser la regulación de alguna reacción química concreta.

RIBOZIMA → PROTEÍNA MODERNA

En 1983 el biólogo húngaro Gánti Tibor argumentaba con la idea de que **si buscamos en esta ruta** que llevó de las ribozimas a las proteínas enzimáticas, ambas con funciones parecidas, **encontraremos el origen del software genético**, desde la duplicación de polímeros basada en pares de nucleótidos hasta el origen de la cadena de montaje de las proteínas que, como vimos al final del capítulo anterior es el resultado de una relación entre nucleótidos, una ribozima y aminoácidos: los ARN mensajeros y de transferencia, en el ribosoma, capturando aminoácidos para formar las proteínas.

El proceso pudo ser como se describe a continuación, siguiendo una idea del también biólogo húngaro Eörs Szathmáry (ver la figura siguiente).

En la "sopa" del mundo bioquímico cuasi primitivo donde nos movemos *coexistían de forma independiente los ácidos nucleicos tipo* ***ribozimas*** *con* ***nucleótidos*** *y* ***aminoácidos***. Eran unas más dentro del infinito número de moléculas que se estaban gestando en aquel ambiente. Los aminoácidos interactuarían con las ribozimas mediante espontáneas uniones químicas, ayudándolas a *mejorar la función enzimática y a facilitar su replicación.*

Paso 0. LOS AMINOÁCIDOS AYUDAN A LAS RIBOZIMAS

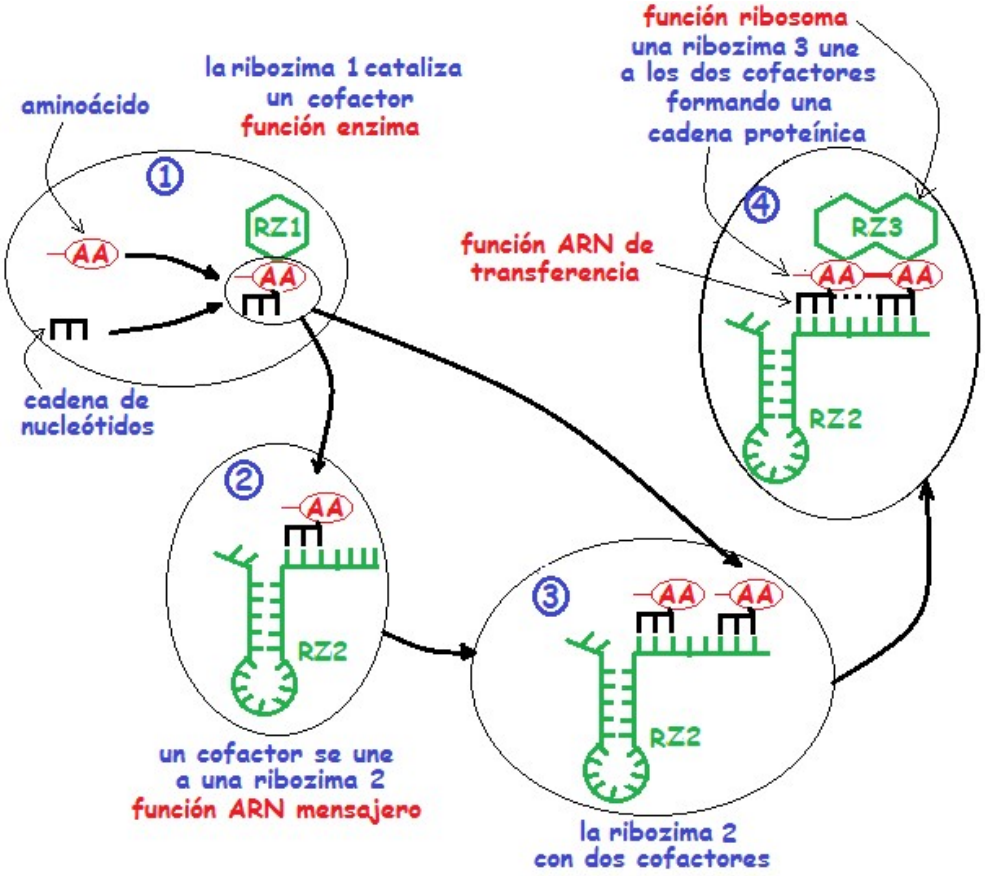
¿Cómo consiguieron establecer esta colaboración? Las propias ribozimas (RZ1) se encargaron de catalizar una unión entre aminoácidos y nucleótidos, con el resultado final de que se iban formando unas "moléculas ayudantes", técnicamente un *cofactor, con la particularidad de que posteriormente algunas de ellas se adaptarían sobre otra ribozima*.

Pasos 1 y 2. AMINOÁCIDOS + NUCLEÓTIDOS + RIBOZIMAS → COFACTOR → UNIÓN DE COFACTOR CON OTRA RIBOZIMA

La estructura de unión entre aminoácidos del cofactor y una segunda ribozima (RZ2) la formaba la cadena de uno a varios nucleótidos del cofactor, que se unirían por el sistema de pares a los nucleótidos de la ribozima (RZ2). Estas uniones serían muy específicas a la vez que fácilmente reversibles, características que más tarde iban a ser cruciales en la replicación del ADN con la posterior traducción a proteínas. La teoría avalada por experimentos demuestra que una tríada de nucleótidos puede presentar las mejores características para este tipo de enganche. Lo que nos lleva a la idea de los codones del código genético.

En el proceso, representado en la figura siguiente, nos encontramos ya con una ribozima (RZ1) catalizando un cofactor, la figura más

ancestral de una **enzima**. Luego tenemos a un cofactor unido mediante pares de nucleótidos a una ribozima (RZ2), que ejerce una función de algo semejante a un **ARN mensajero**. En estas uniones nos encontramos con lo que probablemente serían tríadas de nucleótidos, una de las bases del **código genético**. Pero también podemos imaginar que este esquema podía repetirse de manera que se formara una cadena de varios aminoácidos, colateral a otra cadena de tripletes de nucleótidos, colateral a su vez a una tercera cadena, la de la ribozima.



Posible inicio de las diversas funciones del ARN según la teoría del biólogo Eörs Szathmáry (A partir del libro de John Maynard Smith "The major transitions in evolution"). En esta imagen las ribozimas, representadas por hexágonos, no ejercían función estructural, sino solamente la función de ayuda catalizadora.

Paso 3. FORMACIÓN DE CADENAS DESUNIDAS DE AMINOÁCIDOS, TRIPLETES DE NUCLEÓTIDOS Y RIBOZIMAS

Otra ribozima (RZ3) debió catalizar la unión de los aminoácidos transformándolos en algo parecido a una primitiva **cadena proteínica**, de forma que, en primer lugar, la ribozima base ejercería la función de ARNm portador de la información; en segundo la cadena intermedia de nucleótidos formaría lo que puede considerarse un ancestro del **ARNt de transferencia** (interpreta la información del ARNm mensajero y la transforma en aminoácidos); y por fin las cadenas de aminoácidos catalizadas por la ribozima RZ3, antecedente del **ribosoma**, acabarían constituyendo oligopéptidos (proteínas o semejantes).

Paso 4. UNIÓN DE LAS CADENAS FORMADAS EN EL PASO → FORMACIÓN DEL SOFTWARE GENÉTICO

El siguiente paso sería la reutilización de las cadenas de nucleótidos que quedarían libres tras el proceso. En este momento es cuando se debió diferenciar en la estructura del ribozima mensajero las fracciones que desarrollarán la "**función gen**": algunas partes se comportarían mejor como mensajeros, perdiendo poco a poco su capacidad catalítica, mientras que otras partes seguirían con su función metabolizadora como enzima. Esta división aportaría ventajas en cuanto a la rapidez de la función enzimática y la reutilización de los mensajeros: el resultado pudo ser el inicio del **ARNr (ribosómico)** a partir de la ribozima RZ3.

La anterior hipótesis de Eörs Szathmáry puede ser plausible, aunque seguimos con incógnitas de las que desconocemos su solución: la duda se centra en el tamaño, ya que el ARNm es más largo que una ribozima y las proteínas son más largas que los oligopéptidos sintetizados en el proceso anterior.

Y ahora, una vez conocidas las bases generales de la genética a partir de lo dicho en este capítulo, pasaremos a analizar los principios universales de uno de sus principales subproductos: la herencia. E intentaremos explicar los misterios de la división celular y la transmisión de la carga genética.

NOTAS DEL CAPÍTULO 13:

1. La molécula de agua es ligeramente dipolar ya que los protones del núcleo del oxígeno "atraen" al conjunto de los electrones de la molécula, dejándola como un imán. Esta bipolaridad es la que le permite constituir enlaces por puente de hidrógeno con otras moléculas también polares.
2. Un **enlace fosfodiéster** es un tipo de enlace químico covalente que se produce entre un grupo hidroxilo (OH^-) en el carbono 3′ y un grupo fosfato (PO_4^{3-}) en el carbono 5′ del nucleótido entrante, formándose así un doble enlace éster.
3. Para los que tengáis más curiosidad podéis bucear por la web del proyecto ENCODE enlazando aquí [*https://www.genome.gov/10005107/]* o aquí

   [*http://genome.ucsc.edu/ENCODE/]*

4. Como nos comenta el neuroendocrinólogo estadounidense Robert Sapolsky en su interesante libro "*Compórtate*", pag. 340: "*Una hembra huele a su recién nacido… las moléculas olorosas que salen del bebé se unen a receptores situados en su nariz. Los receptores se activan y (muchos pasos después en el hipotálamo) se activa un factor de transcripción, conduciendo así la producción de más oxitocina… que provoca la bajada de la leche.*"
5. Para profundizar más en este último tema recomiendo el revelador libro "*How life works*" de Philip Ball
6. Los informáticos conocen bien estas rutinas generales, como pueden ser la validación de una fecha, la ordenación de una lista, el cálculo de un dígito de control, etc.

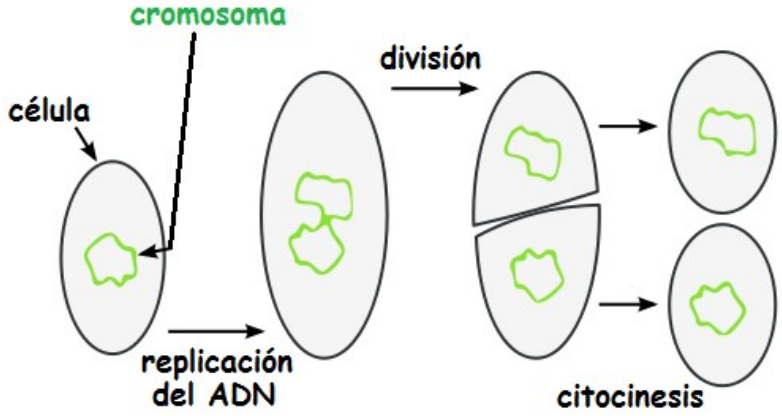
14. La reproducción

En el capítulo anterior presentamos los entresijos del genoma y cómo funciona el proceso, desde la replicación de aquel hasta la generación de proteínas basadas en su información. En este capítulo completaremos esta visión general planteando una visión somera de las vías de transmisión de la información genética, lo que conforma los hechos de la reproducción y la herencia.

¿Por qué vamos a profundizar en las reglas de la herencia?

Precisamente por ser la base fundamental en el análisis de la evolución de las especies. La información genética de los padres se hereda. En el camino, los genes son intervenidos por múltiples factores externos que hacen que varíen, que añadan o que eliminen secuencias genéticas, resumiendo: que modifiquen el genotipo de los seres vivos. Y estas modificaciones heredadas son las que, conjuntamente con la presión ambiental, han conducido a la Vida desde la primera síntesis celular hasta la múltiple variedad de seres que conviven en la actualidad.

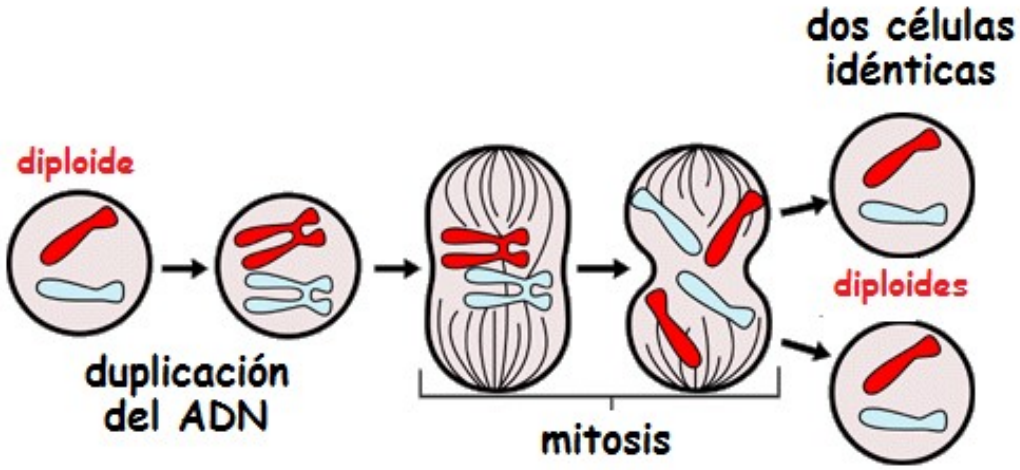
Las células se reproducen. De forma variada. Desde la solución más sencilla hasta seguir procesos más complejos. El objeto de la reproducción es, en definitiva, la continuidad de la cadena de cesión de información genética.



Reproducción por fisión binaria (Wikimedia, GFDL 1.2)

La solución más sencilla es "partirse por la mitad", la **fisión binaria**, que es una *forma asexuada de reproducirse* adoptada por organismos muy elementales como las bacterias y algunas eucariotas unicelulares. Se duplica el material genético, se parte la membrana y el citoplasma, y se reparte todo en dos nuevos seres independientes. Este tipo de reproducción produce una tasa de crecimiento exponencial. Por ejemplo, bajo condiciones óptimas, la bacteria *Escherichia coli* se puede dividir una vez cada 20 minutos.

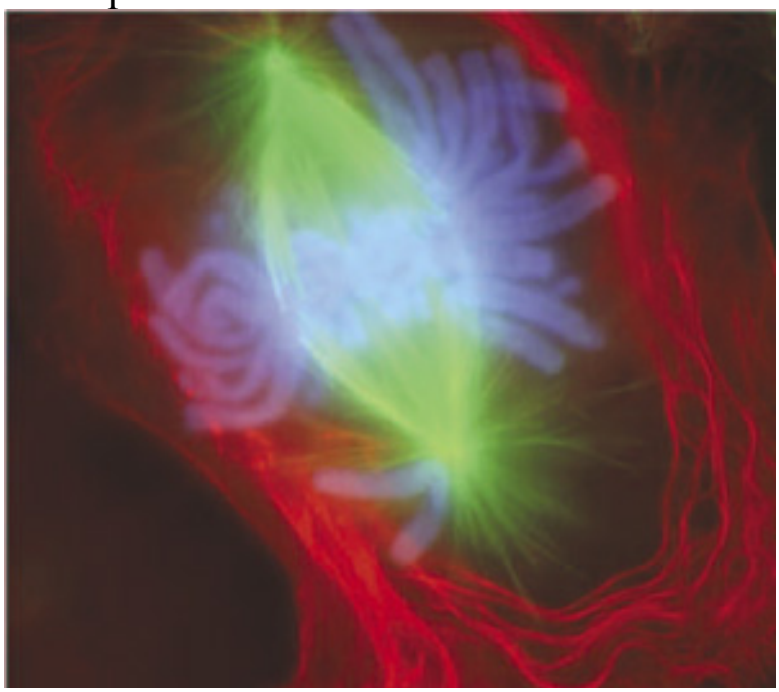
Las desarrolladas células eucariotas han optado por una división más compleja, siguiendo dos necesidades fisiológicas. Por un lado, como componentes fundamentales de los organismos pluricelulares, precisan *reemplazar células* que han muerto o han perdido su funcionalidad, y así reparar los posibles daños del organismo al que pertenecen: en este caso deben hacer copias idénticas y situarlas en el lugar de las caídas en combate. Esto lo consiguen siguiendo el proceso de ***mitosis*** que se explica a continuación.



División por mitosis (Wikimedia, dominio público)

En la **mitosis** se *generan dos células completamente idénticas* a la madre y como hemos comentado es la base para el crecimiento y reparación de tejidos de un organismo complejo o bien la base de la reproducción asexuada. En el primer paso de la mitosis se produce la duplicación de los cromosomas. Inicialmente adoptan

una forma semejante a un aspa con un punto central llamado *centrómero*. A la vez, se duplica un orgánulo del citoplasma que se llama *centrosoma* que es el que organiza el material del citoesqueleto celular, los microtúbulos. Los centrosomas duplicados tienen una forma de estrella con pelos que mientras van creciendo se desplazan cada uno hacia polos opuestos de la célula, generando una especie de huso de microtúbulos.

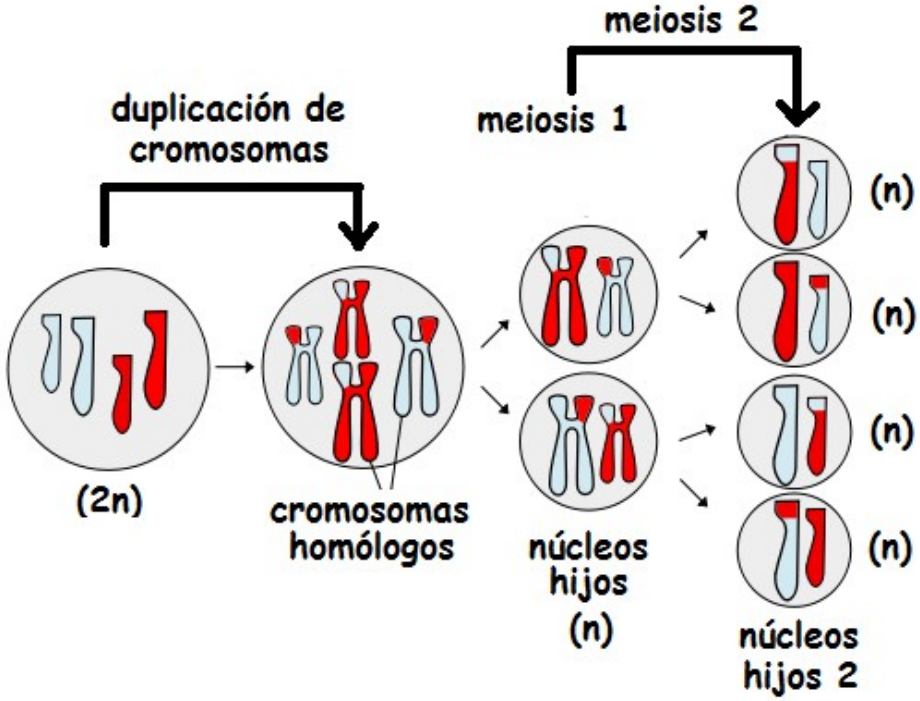


Fase intermedia de la mitosis. Pueden verse los centrosomas ya separados y el huso, ambos en verde, al que ya están fijos los cromosomas de color azul (Wikimedia, dominio público)

Posteriormente se desintegra la *membrana nuclear* quedando libres los cromosomas que se disponen en el plano ecuatorial de la célula. Allí se unen por su centrómero a uno de los microtúbulos del huso el cual va a actuar como cuerda tractora. Los centrosomas situados en los polos tiran de los cromosomas, que se dividen en dos, separando los dos juegos resultantes. Poco a poco los dos paquetes de cromosomas se van rodeando de una nueva membrana nuclear. Mientras, se va dividiendo también el citoplasma, tomando la célula una forma de cacahuete, hasta que finalmente se parte. Y así se consiguen dos nuevas células genéticamente clónicas. Etimológicamente mitosis viene del griego *μιτον*, "hebra" con el

añadido de -*sis*, lo que quiere decir "en situación de, con aspecto de hebras", en referencia al aspecto del huso.

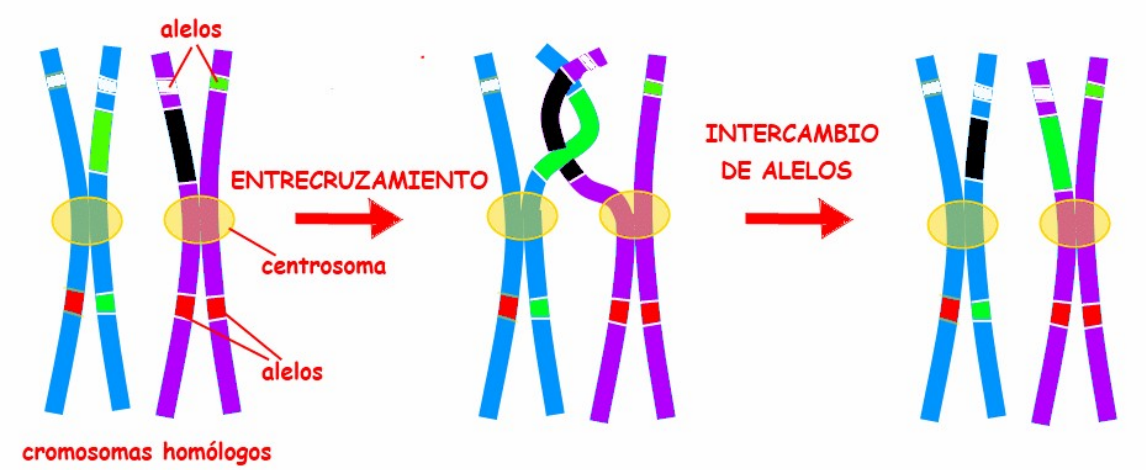
Advertimos aquí que este procedimiento es el primer paso para la *reproducción sexuada* con transmisión de variedad genética. Esto se consigue a través del proceso llamado *meiosis*, que hace posible la existencia de células haploides que llevan la mitad de la dotación cromosómica de la especie a la que pertenece. De esta forma, tras el encuentro posterior de dos de este tipo de células, los gametos, se construirá una célula diploide completa con doble juego cromosómico.



División por meiosis. Obsérvese por el código de colores que hay intercambio de material genético entre cromosomas no homólogos (A partir de Wikimedia, dominio público)

Sin embargo, la **meiosis** es un proceso de división celular por el que una célula con dotación cromosómica doble (2n) experimenta *dos divisiones sucesivas* según un proceso de generación de huso y arrastre de cromosomas parecido al de la mitosis, con el resultado de *generar cuatro células con un juego sencillo de cromosomas* (n) cada una. En la primera división se duplican los cromosomas

formando el aspa. En este estado, a diferencia de en la mitosis, cada pareja de aspas homólogas intercambia material genético por entrecruzamiento. Tras lo cual las parejas de aspas se ven sometidas a un proceso similar a la mitosis, generándose dos células con la mitad de los cromosomas, pero replicados en forma de aspa. En la segunda fase de la meiosis se completa otra mitosis partiéndose las aspas, apareciendo al final cuatro células haploides. Se comprende por tanto el significado etimológico de la palabra meiosis: del griego *μείωσις*, "disminución".



Entrecruzamiento de dos cromosomas con intercambio de alelos, paso inicial de la meiosis 1

Es importante hacer énfasis en lo que se dijo acerca de que en la primera fase del proceso de meiosis los cromosomas homólogos pueden **entrecruzar sus genes** (ver figura anterior) por lo que el cromosoma heredado en el gameto casi con toda seguridad no tiene la misma secuencia de genes que en los cromosomas paternos o maternos originales. Eso ocurre físicamente porque los cromosomas paternos o maternos en la primera fase de sus meiosis se pueden tocar y solapar en parte, de forma que al dividirse se producen errores, ya que se unen fragmentos cromosómicos en donde no correspondería encontrarlos. Como si se barajase el material genético de cada par de cromosomas y se reconstruyeran de nuevo de forma aleatoria. El resultado es que en las células haploides hijas los cromosomas no tienen la misma información genética, no son clónicas, ni el mismo orden de genes que el de la cadena de la célula progenitora diploide.

Con posterioridad, al juntarse los gametos masculinos y femeninos se reconstruyen las células diploides, emparejándose los cromosomas homólogos de ambos gametos. Disponen cada uno de la misma información genética que los padres respectivos pero diferentemente secuenciada y emparejada: el genotipo intrínseco es el mismo, pero el fenotipo, la futura manifestación externa del hijo, puede variar. ***En resumen***, la meiosis es la solución que ha triunfado en los organismos más complejos a partir de la cual se producen gametos masculinos y femeninos, que con posterioridad se unen entremezclando la dotación genética de las células progenitoras masculina y femenina. *El resultado es la generación de un nuevo ser diploide con un acervo genético distinto al de los padres*.

La primera persona que intuyó que en el proceso de la herencia había oculto algo parecido a lo comentado fue el monje agustino austriaco Gregor Mendel, que en el siglo XIX realizó una serie de ensayos con el entrecruzamiento de variedades de guisantes. Seleccionó siete características de estas plantas y vio la evolución de las mismas en las plantas hijas a través de diversas generaciones. Comprobó cómo se iban transmitiendo estas siete características de una generación a otra y con qué proporciones se repetían, desaparecían o se entremezclaban. Y sacó una serie de conclusiones[1] experimentales que podían resumirse en que cuando cruzaba dos variedades puras –no híbridas- de una misma especie, los descendientes *eran todos iguales* e idénticos a uno u otro progenitor. Además constató que al cruzar entre sí los híbridos de la segunda generación, sus descendientes se repartían entre *cuatro fenotipos diferentes*, uno el de su abuela, otro el de su abuelo y los dos restantes el de sus progenitores directos. Mendel también observó que algunas veces no pasaba lo anterior, ya que *rasgos diferentes eran heredados* ***de forma independiente*** *unos de otros***,** de forma que el patrón de cómo se heredaba un rasgo no afectaba al patrón de herencia del otro. Se podía heredar uno sólo, o el otro, o bien los dos, sin una norma exacta y repetitiva. Pero nunca supo por qué sucedía lo que él observaba.

Lo atribuyó a unos *factores* que serían algo así como entidades independientes en el proceso de la herencia. Unos, los *dominantes*, se repetían generación tras generación y otros, los *recesivos,* desparecían. Hoy sabemos que estos factores son los **genes**, y sus recombinaciones son consecuencia de la existencia de los dos **alelos** que codifican cada característica. Los alelos son cada una de las formas alternativas que puede tener un gen y que se encuentran en el mismo lugar físico de cada cromosoma de la pareja de homólogos.

Tras este rápido repaso sobre la genética y la herencia estamos ahora en condiciones de recuperar la biografía de la Vida, que la habíamos dejado al final del capítulo 12 en un punto en que se había conquistado el núcleo celular y la estrategia de la reproducción sexuada que le conducirá al final por un excitante y variado camino. En el próximo capítulo avanzaremos a través del siguiente salto evolutivo de los ocho fundamentales en la serie de John Maynard: el paso hacia la multicelularidad por la que la célula eucariota forma asociaciones en pos de la eficiencia.

NOTAS DEL CAPÍTULO 14:

1. Conocidas como las **leyes de Mendel,** un conjunto de reglas básicas sobre la transmisión por herencia genética de las características de los organismos padres a sus hijos.

15. La multicelularidad puerta de la complejidad

En el capítulo anterior se habló sobre temas tan generales como la genética y la herencia, aspectos fundamentales de la vida de los organismos que vivían durante el Proterozoico, un periodo tan vasto que transcurrió desde hace 2.500 hasta 542 millones de años. Lo sorprendente es que las mismas estrategias de entonces son las que utilizan los seres vivos de hoy en día. En este capítulo vamos a avanzar en el caminar de estas criaturas con una inmersión en una nueva habilidad: la célula eucariota se busca socios para crear complejidad vía la multicelularidad. Adelanto que no hay una especie de "LUCA", un ancestro común, de los organismos pluricelulares, siendo esta particularidad resultado de la evolución a partir de diversas y diferentes eucariotas.

Si por organismo multicelular entendemos simplemente el formado por varias células, entonces la multicelularidad es tan antigua como los más antiguos fósiles. Sin embargo la mayoría de los biólogos distinguen entre organismos coloniales y los verdaderamente multicelulares, aunque sea difícil precisar el matiz que los distingue**.** Los auténticos multicelulares presentan una cierta relación de *interdependencia entre sus células* y además las tienen *de varios tipos*, cada una de ellas *especializada en funciones diferentes*. Las células se mantienen unidas dentro de una especie de membrana y tienen la capacidad de influir sobre el desarrollo de sus vecinas. Además, los espacios intercelulares suelen estar rellenos de moléculas estructurales, como pueden ser la proteína colágeno o la molécula inorgánica hidroxiapatita, responsable de la dureza de los huesos.

Si se admite el anterior criterio, la multicelularidad se ha producido en varias ocasiones tanto en tiempos de procariotas como con las eucariotas. Incluso las colonias bacterianas podrían ser multicelulares, ya que en ellas las células individuales se

comunican y forman subgrupos con comportamientos especializados.

¿Por qué ha aparecido la multicelularidad tantas veces a lo largo de la historia? Posiblemente porque es el resultado de la adaptación al medio. Quizás un entorno hostil llevó a un pequeño ser unicelular a tener que protegerse asociándose y creando un entorno interno controlado. O bien, quizás fue su respuesta defensiva frente a la amenaza de los depredadores incrementando su tamaño para protegerse, cosa que conseguía metido en un grupo; o puede que constituyera una asociación que mejoraba la capacidad de movimiento de sus individuos y por ello podían acercarse al alimento o escapar del depredador más fácilmente.

Sea como fuere parece ser que la multicelularidad es un proceso prácticamente ineludible como así lo sugiere las conclusiones de un trabajo de laboratorio[1] en el que a unas levaduras les bastó solamente 100 generaciones en un tubo de ensayo para agruparse en una especie de copos. Y no sólo esto, sino que crecían de tamaño, se reproducían e incluso se producía una diferenciación entre sus células. Características todas ellas propias de un organismo multicelular.

Se sabe que los seres unicelulares *independientes* disponen de las mismas herramientas, aunque más sencillas, que las que utilizan los pluricelulares para construir sus organismos. Disponen de las mismas proteínas que sirven de unión, como un velcro, con las células de su entorno. Disponen de las mismas proteínas que transmiten mensajes y generan reacciones en sus más próximas vecinas. Sobre sus membranas exteriores también pueden encontrarse moléculas de colágeno. Las proteínas que regulan la gastrulación embrionaria de los organismos pluricelulares las encontramos en los seres unicelulares, posiblemente para dirigir sus ciclos vitales. Sólo bastó acomodar la función de la estrategia genética -genes, proteínas, transcripción, ARN no codificante,...- ya existentes en las células individuales de forma que pasaron a coordinar funciones diferentes a las que controlaban hasta

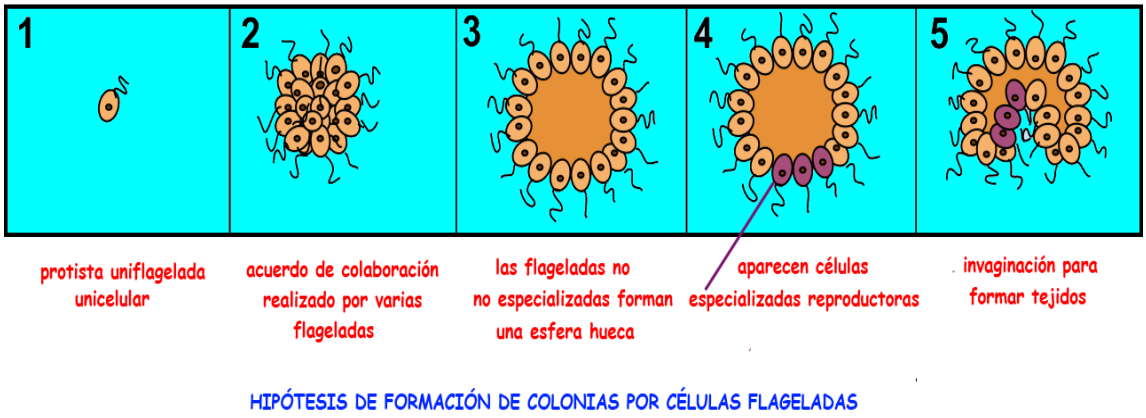
entonces. Y esto no fue una tarea demasiado ardua ya que se conocen diversos mecanismos evolutivos que pudieron facilitar este cambio. En particular para los genes o por su duplicación, o bien barajando exones con otros genes, o ejecutando modificaciones en sus redes de relaciones o simplemente acomodándose a la nueva función.

Las posibles estrategias de defensa que fomentaron la multicelularidad y que hemos comentado más arriba, han sido comprobadas mediante diversos experimentos[2] con algas unicelulares a las que se les ha dejado reproducir libremente. Tras unas mil generaciones se las ha mezclado con predadores también unicelulares. Unas cien generaciones más tarde estas algas se habían asociado formando unas bolas de dieciocho individuos, lo suficientemente grandes como para que no fueran engullidos por el predador y lo suficientemente pequeña como para que la luz solar llegara a todos sus miembros.

La conclusión que se extrae de lo anterior es que el salto a la multicelularidad en la naturaleza no fue tan especial, las habilidades estaban allí, sólo había que motivarlas. De lo demás se encargó la selección natural. Aunque bien hay que reconocer que la tarea le tuvo ocupada casi dos mil millones de años.

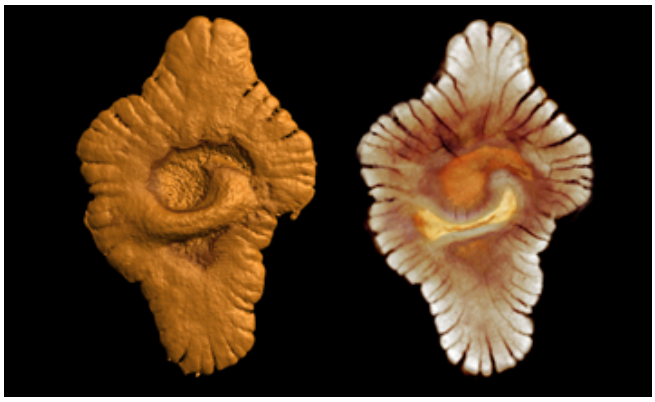
No todos los organismos multicelulares se crearon de la misma manera. Las opiniones más contrastadas apuestan por hasta ***cuatro tipos de inicios***: Un tipo surgiría con el fallo en la división celular paterna por el que no llegan a producirse células hijas, sino que queda una gran masa citoplasmática con muchos núcleos envuelta en una membrana, que más tarde se transformará en un grupo de células independientes. O simplemente la división celular sí se produce y el fallo viene justo después, tras el cual las células hijas son incapaces de separarse. Una tercera posibilidad apunta a lo que parece más plausible, es decir, que el ser pluricelular sería el resultado de la unión de varias células independientes que comienzan a colaborar a un mismo nivel de rol vivencial. Una última hipótesis postula que el organismo multicelular se produjo

como un organismo "quimérico" tras unas simbiosis, en la que cada célula aporta su grano de arena a la asociación según sus habilidades.



(A partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

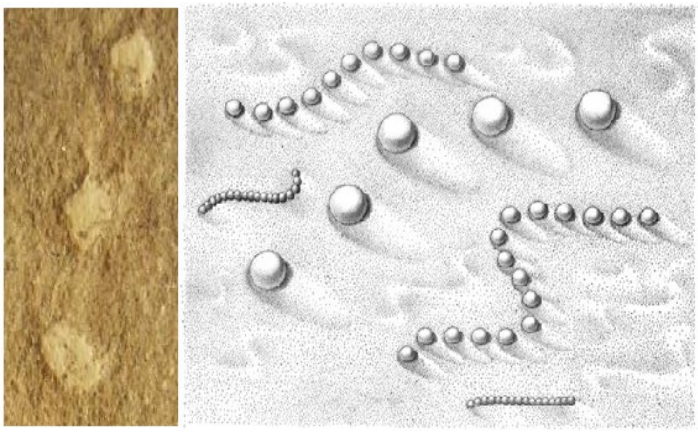
Ya hablamos en el capítulo 12 de esta serie acerca de la eucariota *Grypania spiralis,* cuyas evidencias fósiles son muy antiguas (2.100 millones de años), y de la que se cree que era un organismo que optó por la modalidad de no dividir su citoplasma. Forma unos fósiles del tipo de "películas de carbón", unas improntas bidimensionales encontradas en las rocas del Proterozoico. Posiblemente formaban tapetes bacterianos, aunque algunos tienen unos elementos como escamas y pedúnculos que se asemejan a algas.



Reconstrucción virtual de la morfología externa (izquierda) e interna (derecha) de uno de los fósiles de Gabón datados en 2.100 millones de años (Abderrazak El Albani et al, 2010, Nature, ver nota 3 a final de capítulo, fair use)

También hemos hablado de los controvertidos fósiles del Gabón, datados hace unos 2.100 millones de años. Por la época serían bacterias, y se han conservado gracias a que su materia orgánica se había piritizado entre sedimentos. Al estudiarlos mediante técnicas de microtomografía y de espectrometría de masas se ha visto que tanto sus estructuras como sus propiedades químicas correspondían a restos de seres vivos multicelulares.[3]

Pero realmente la eucariota multicelular más antigua puede que sea el metazoo *Horodyskia*. Sus fósiles se han encontrado en rocas[4] que datan de hace unos 1.500 a 900 millones de años. Se les describe como una cadena de perlas conectadas por sus pies mediante una especie de zarcillo. Al comparar estos fósiles situados en un entorno muy próximo se ha visto que se reorganizaban a medida que el sedimento donde se encontraban crecía de espesor, reagrupándose los especímenes más pequeños formando unos más grandes.



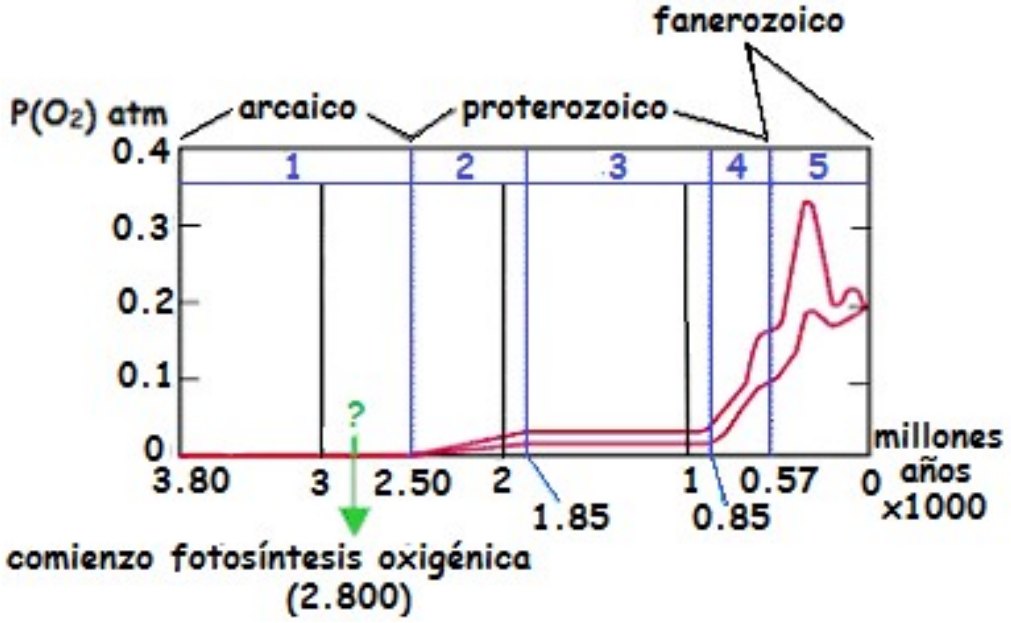
Fósiles de Horodyskia y representación artística de sus colonias (Fedonkin y Yochelson, 2002, ver nota 4 a final de capítulo., fair use)

De la misma época, 1.560 millones de años, serían los fósiles de lo que parecen unos organismos multicelulares macroscópicos -de hasta 30 centímeros- encontrados en el yacimiento chino conocido como Gaoyuzhuang Formation.[5] La comparación con plantas del tipo taloide, es decir, las que no tienen tallos, hojas ni raíces -como

las más primitivas colonizadoras del medio terrestre-, sugiere que debían ser organismos fotosintéticos y que, por tanto, habrían sido actores importantes en el aumento del oxígeno libre en nuestro planeta.

También se han encontrado impresiones y surcos en rocas australianas y de la India, de hace 1.200 millones de años, que semejan las huellas producidas por organismos móviles.

En cualquier caso, tanto los antiguos acritarcos como los ya evolucionados organismos multicelulares eucariotas, se dirigían hacia una fase de mayor diversificación y complejidad, cuyo prólogo se dio hace más de 1.000 millones de años. Sería posible, aunque de forma especulativa, que esta expansión estuviera correlacionada con el final de un periodo de estabilidad global. Aunque sí podemos conjeturar una consecuencia de la multicelularidad. Como podemos ver en la curva que ya mostrábamos en el capítulo 10 y que repetimos aquí, la época del inicio de la escalada de la multicelularidad se adelanta a la del segundo despegue de la concentración de O_2 en la atmósfera terrestre.



Evolución del contenido atmosférico de oxígeno a lo largo de los últimos 3.800 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El O_2 es esencial para la síntesis a gran escala del colágeno, que como ya se ha comentado es a su vez un elemento esencial en la estabilidad estructural de los organismos pluricelulares. No sabemos muy bien el porqué, pero sí es cierto que lo que estaba pasando influyó y mucho. La existencia de un único supercontinente (Rodinia), la fragmentación de los habitats al disgregarse paulatinamente por las fuerzas geológicas, los pequeños cambios climáticos durante un prolongado periodo de estabilidad, etc, dibujan un escenario en el que había aparecido un conjunto de nuevos vectores que cambiaron los niveles de presión selectiva. Bien pudo ser que el incremento del O_2 impulsara el inicio de la radiación de las eucariotas hacia los organismos vivos actuales.

Fuera lo que fuera, no consideremos a la multicelularidad propiamente como un "avance" sino como una alternativa más de supervivencia, en unos momentos en que se pudieron estar abriendo nuevos nichos ecológicos dispuestos a ser colonizados por organismos con capacidades no vistas hasta entonces. Sin menospreciar el hecho de que estas capacidades novedosas fueran el factor selectivo preciso para medrar, al usar nuevos procedimientos, en los hábitats de siempre. Sin lugar a dudas la multicelularidad, por sí misma, fue un hito en el devenir filogenético que hizo posible a ciertos organismos la conquista de nuevas habilidades biológicas, como pudo ser la especialización de las células por funciones vitales o la propagación por células con capacidad de reproducción, que a fin de cuentas son las que llevaron a las espectaculares formas de vida actuales, que tanto nos asombran a los humanos.

La Vida se hace definitivamente compleja

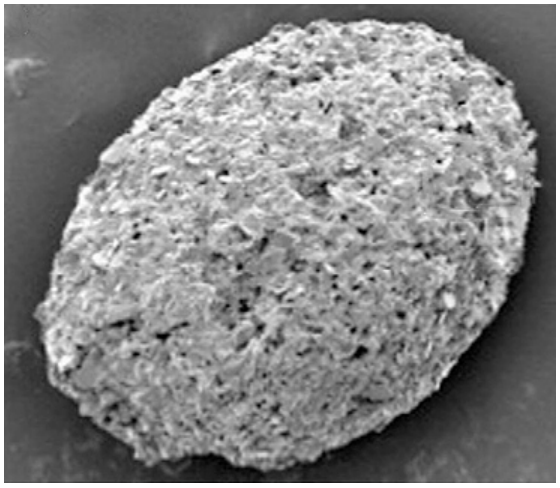
Los organismos que vivían en aquella época se encontraron con una amenaza adicional que debieron sortear: La ya comentada glaciación "bola de nieve" de hace 700 millones de años. En esta época, como ya sabemos, la biosfera estaba constituida básicamente por microorganismos acuáticos. Muchos de ellos se

extinguieron como consecuencia del frío y la vida estuvo a punto de desaparecer por completo del planeta. La pregunta es ¿cómo pudo subsistir durante los largos años de "*snow ball*"?

Se cree que algunos organismos pudieron sobrevivir porque al congelarse lentamente el agua a lo largo del pausado transcurrir de los millones de años, se transformó en un hielo muy transparente. La escasa luz que lograba atravesar la enorme capa de hielo sobre el mar bastaba para mantener el primer eslabón de la cadena alimenticia. Otros organismos seguían manteniéndose en los ecosistemas de las dorsales oceánicas que no habían dependido nunca de la luz del sol y que seguramente no fueron perturbados por la glaciación. En los fondos marinos existían las conocidas fumarolas (recordemos que son emanaciones calientes de gases e iones que surgen por las grietas de la corteza submarina) que, al igual que sucede en las actuales, pudieron albergar importantes comunidades de organismos extremófilos, con unos metabolismos totalmente independientes del sol. La Vida bien pudo resistir la glaciación global en tales ecosistemas.

En depósitos glaciares de sitios tan alejados geográficamente como el norte de Namibia o Mongolia se han descubierto fósiles de criaturas microscópicas muy simples, que debieron ser las primeras en aparecer después de que terminara el periodo de glaciación inicial, hace 710 millones de años. Se cubrían con una concha mineral de forma redondeada o tubular, presentando la mayoría de ellos un cuello a su final, a través del cual saldría un pie del organismo. Esas conchas están hechas de partículas de compuestos de silicio, aluminio y magnesio, que estas criaturas recolectaban en su entorno y que luego unían unas a otras acumulándolas sobre su superficie para así formar una protección mineral que les ayudaría a sobrevivir en las condiciones heladas de su hábitat.

En la imagen siguiente, tomada con un microscopio electrónico, podemos ver la forma de estos pequeños fósiles de hasta 10 micras de grosor.[6]



Fósiles de hace 710 millones de años, protegidos por una capa de arena (Fuente: Tanja Bosak, reproducido con el permiso de MIT News, ver nota 6 a final de capítulo, fair use)

La realidad es que, a pesar de que haya evidencias de la existencia de microfauna, esta tremenda glaciación dejó la vida esquilmada, lo que supuso una oportunidad para los supervivientes, que aprovecharon los espacios abandonados para experimentar nuevas formas. Fue el momento difuso durante el que se debió producir el triunfo del trascendental salto evolutivo hacia los primeros **organismos con tejidos diferenciados y cavidades internas**.

No hacía mucho que las células que se habían asociado en colonias habían también empezado a especializarse, encargándose de determinadas funciones y abandonando otras. La decisión no comportaba grandes riesgos para cada uno de sus individuos, ya que la colaboración del grupo les mantenía las espaldas cubiertas: las funciones que abandonaban las desarrollaban otras células de su comunidad. Todo ello suponía una ventaja competitiva enorme, pues la especialización suponía un menor gasto de energía en sus metabolismos, ya que todas y cada una de las células no debían desarrollar todas y cada una de las funciones necesarias para subsistir. Y sabemos que no malgastar los recursos energéticos es clave en el competitivo mundo de la naturaleza.

Para encontrar la primera evidencia fósil que tenemos de **organismos multicelulares complejos**, es decir, con tejidos

diferenciados, hay que desplazarse atrás en el tiempo hasta hace 600 millones de años, aunque los análisis moleculares dan una fecha anterior, cerca de 750 millones de años, cuando se inició este camino en el árbol de la Vida. Recientes descubrimientos [7] en formaciones rocosas sedimentarias de Omán apuntan a la existencia de esponjas hace ya 635 millones de años. Contemporáneos de ellas, entre 630 y 550 millones de años, serían los fósiles de la conocida como formación de Doushantuo en China. Incluyen embriones de metazoos, larvas y microfósiles desconocidos, posiblemente de ancestros del filo Cnidaria - medusas y pólipos-. Se especula con la idea de que pudieron ser los promotores de la expansión **biota Ediacara**. La radiación de esta biota se produjo a lo largo de un periodo de 25 millones de años (565-540 millones de años) para luego desaparecer.



Cría de rangeomorfos de hace 580 millones de años (Jack Matthews, universidad de Oxford) y fósil de Coronacollina acula (crédito de la imagen: Droser lab, UC Riverside, ver nota 8 a final de capítulo, fair use)

Los más antiguos de estos organismos complejos se han encontrado en Mistaken Point Ecological Reserve, uno de los yacimientos clásicos de la fauna ediacarense. Parecen ser crías de este tipo de animales, en concreto de rangeomorfos, organismos con forma de fronde u hoja de helecho, que superficialmente se parecen a algunos tipos de *corales* pero que en realidad no tienen paralelismo con ninguna criatura de la actualidad. Se cree que

quedaron sepultados en cenizas volcánicas hace 579 millones de años.

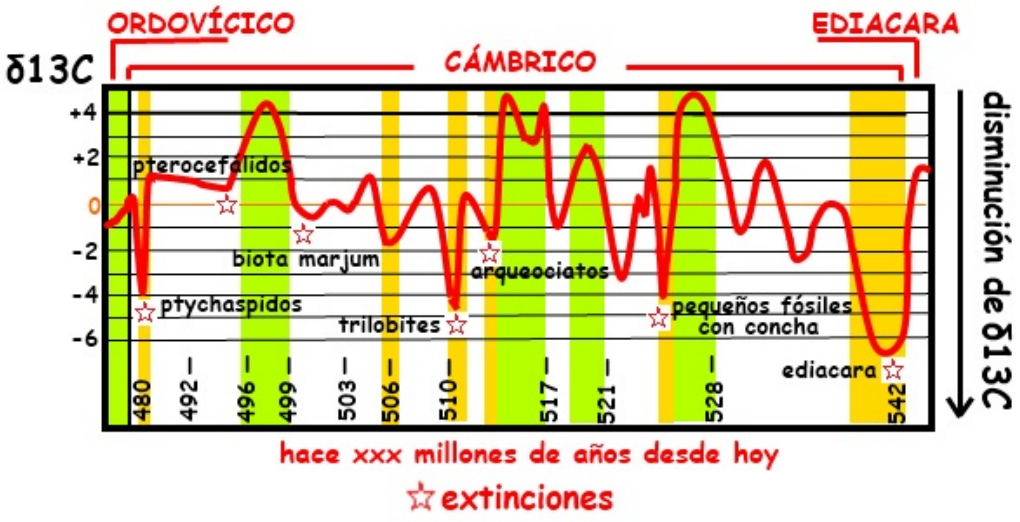
Un poco más recientes son los fósiles de un animal encontrados en Australia con una estructura próxima a un esqueleto. Están datados entre 560 y 550 millones de años, lo que los sitúa dentro del Ediacarense, antes de la explosión del Cámbrico. Se le ha llamado *Coronacollina acula* (ver imagen anterior) y vivía en el fondo oceánico. Muestra un cuerpo principal con forma de cono truncado del que partían unas espículas que medían de 20 a 40 centímetros de longitud. La construcción de este ser es similar a las *esponjas* cámbricas, por lo que se le supone un estilo de vida semejante. [8]



Fauna Ediacara: Arriba Tateana inflata y Charnia. Abajo Dickinsonia costata, que muestran la apariencia «acolchada» típica de muchos organismos de esta biota (Wikimedia, GFDL 1.2)

Las primeras evidencias de la **fauna Ediacara** se obtuvieron en Australia, huellas delicadas de pequeños organismos de formas diversas, normalmente discos, cintas o plumas. Con posterioridad se han encontrado abundantes fósiles similares por todo el mundo.

Los animales ediacáricos son los organismos multicelulares complejos más antiguos conocidos, ancestrales formas de vida con cuerpos blandos que no presentaban boca, ni ano, ni órganos internos reconocibles. Podían llegar a medir más de un metro en algunas ocasiones, por sólo unos cinco milímetros de espesor. La solución de "cuerpo plano" sería la que eligieron para equilibrar el incremento de tamaño corporal, es decir volumen, con el necesario incremento de superficie a través de la cual llevar a cabo las imprescindibles interrelaciones con el medio ambiente. Muchos presentan simetría radial o espiral de tres o cinco radios, siendo minoría los organismos de simetría bilateral. La mayoría vivirían inmóviles sobre el sustrato y los más móviles no eran más complejos que una medusa. Los fósiles de Ediacara se encuentran en rocas sedimentarias areniscas, lo que sugiere que vivían preferentemente en aguas poco profundas. Sus estructuras planas no debían ser muy consistentes y resulta difícil imaginar cómo se las arreglarían en el centro de fuertes corrientes y oleajes.



Curva del δ13C durante el Cámbrico desde finales del periodo Ediacara (a partir de Babcock et al., 2005 [9])

A finales de esta época se detecta una fuerte y corta anomalía en el carbono ambiental, un descenso del $\delta^{13}C$ -un indicador geoquímico que relaciona los isótopos 12 y 13 del carbono- que es a menudo asociado a extinciones en masa en periodos posteriores al ediacárico, como ocurrió durante el Cámbrico. Lo que a muchos hace pensar en un fenómeno breve, a escala geológica, y catastrófico que pudo eliminar a la fauna ediacara, ya que efectivamente se ha comprobado que desapareció de forma abrupta.

Las causas de esta rápida extinción no están muy claras y se prestan a las más diversas teorías. Quizás coexistieron a la par de otra fauna que les modificó el hábitat, o bien pudiera ser que desaparecieran como consecuencia de la presión de depredadores mejor adaptados, aquellos que luego pervivieron con posterioridad. Todo ello unido a posibles cambios de las condiciones ambientales en los lugares donde habitaban, o por alteraciones causadas por la deriva y disgregación de los continentes, por la variación del nivel o de la química de las aguas oceánicas, por una crisis de nutrientes o por alteraciones en la composición de gases y temperaturas de la atmósfera. Se considera por tanto que estos organismos formarían parte de una especie de "experimento fallido" de la vida multicelular, en un momento en el que aparecieron gran cantidad de fenotipos novedosos que a la postre no funcionaron. Si en su momento fue ésta la única vía de la Vida, su extinción supuso que ésta tuviera que reinventarse y evolucionar con posterioridad a partir de organismos unicelulares no relacionados con los ediacaros.

En el siguiente capítulo, al amparo del genial biólogo Richard Dawkins, seguiremos el árbol filogenético de estos seres que iniciaron su camino durante el Precámbrico, para acabar presentando a los que se prepararon a atravesar la frontera con el nuevo eón, el Fanerozoico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 15:

1. Trabajo publicado en la revista PNAS de enero de 2013. "*Experimental evolution of multicellularity*", William C. Ratcliff et al.
2. "*Phagotrophy by a flagellate selects for colonial prey: A possible origin of multicellularity*", Martin E. Boraas, Dianne B. Seale y Joseph E. Boxhorn. Informe publicado en la revista Evolutionary Ecology de febrero de 1998 en donde se amplía el tema.
3. El descubrimiento se ha reportado por Abderrazak El Albani et al, 2010, en la revista Nature: "*Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1 Gyr ago".*
4. Reportado en este artículo, "*Middle Proterozoic (1.5 Ga) Horodyskia moniliformis Yochelson and Fedonkin, the Oldest Known Tissue-Grade Colonial Eucaryote*" de Smithsonian Contributions to Paleobiology, númer 94 (2002), Mikhail A. Fedonkin y Ellis L. Yochelson.
5. El informe apareció en la revista Nature en mayo de 2016. "*Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China*", Shixing Zhu et al.
6. El informe reportando el descubrimiento, "*Life after Snowball Earth*" (2011) lo podéis obtener en la web del MIT.
7. El estudio "*Fossil steroids record the appearance of Demospongiae during the Cryogenian period*" es del equipo de Gordon D. Love et al. publicado por la revista Nature en febrero de 2009.
8. El descubrimiento de *Coronacollina acula* se ha reportado por la Universidad de California, Riverside, en marzo de 2012. "*Oldest Organism with Skeleton Discovered in Australia*".

9. "*Ediacaran-cambrian stratigraphy and paleontology of western Nevada and eastern California*", Soo Yeun Ahn (2010).

16. El árbol filogenético del precámbrico

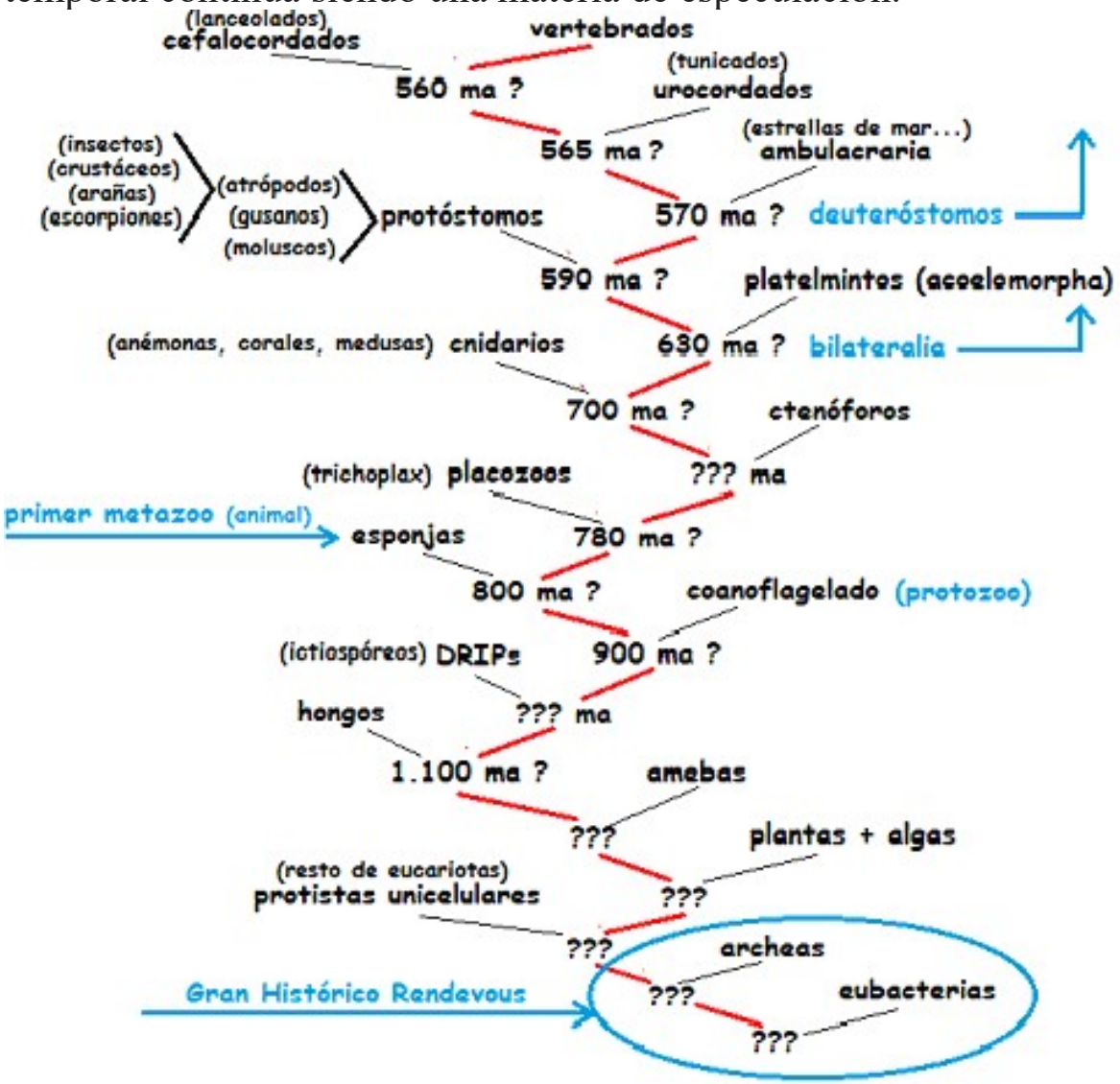
Estamos llegando hacia el fin de los primeros 4.000 millones de años. En este capítulo avanzaremos por el que pudo ser el camino de diversificación de formas que siguieron los organismos vivos, partiendo de los elementales que poblaban el Proterozoico y que manifestarán todo su esplendor durante el siguiente eón, el Fanerozoico, que comenzará con el Cámbrico. Periodo en el que veremos como las familias animales y vegetales iniciaron una diversificación de especies que definitivamente serían las precursoras de las actuales.



El simple estudio de la traza fósil puede engañarnos al plantear una historia no muy conexa, en la que parece que sólo existen los organismos vivos que ha desvelado el martillo del paleontólogo en el interior de una roca antigua. Pero estos organismos tienen sin duda un pasado complejo, lleno de antecesores que bien pudieron serlo también de seres contemporáneos. Todos los organismos vivos estamos emparentados en una red familiar que se extiende desde la nebulosa del tiempo más primitivo.

Las relaciones familiares de las especies en el periodo donde nos encontramos, el Proterozoico precámbrico, se encuentran difuminadas a lo largo de una pista muy etérea de evidencias fósiles difícilmente analizables. A nuestra ayuda acuden las nuevas tecnologías y el avance en los estudios de biología molecular que nos permiten centrar mejor la horquilla de hipótesis sobre las

relaciones cruzadas entre seres vivos, aunque la exacta datación temporal continúa siendo una materia de especulación.



*Árbol filogenético correspondiente al Proterozoico, a partir de lo descrito por Richard Dawkin en su libro "The ancestor's tale" (**ma**: millones de años)*

El etólogo y zoólogo britano-keniata Richard Dawkins ha propuesto un posible camino para la última mitad del Proterozoico, basado en los resultados más verosímiles de estratigrafía, fenotipo fósil y datación molecular. Su "árbol filogenético", el croquis de la irradiación de los nuevos filos, se plasma en el esquema anterior, en donde las cifras indican los millones de años que nos separan

del punto de diversificación. Por desgracia, aún hay muchos signos de interrogación.

No se trata de una historia en zigzag. No se trata de una evolución lineal. Es la orla académica de los seres vivos. Resultado de millones de cruces genéticos sexuados, de intercambio horizontal de genes, de alianzas simbióticas, de errores en las trascripciones del ADN, de mutaciones por impactos de partículas y radiaciones… modelados por el particular medio ambiente de cada momento, expandiendo las oportunidades y limpiando las debilidades.

En cada punto de bifurcación de la senda del esquema anterior vivía un ancestro común. En cada momento, en cada línea de corte horizontal del esquema, podemos asegurar que convivían muchos de los seres que aparecen por debajo de esta línea imaginaria, ellos o sus descendientes. Y que siguieron haciéndolo por encima de la raya, formando un grupo en el que seguían apareciendo nuevas formas y soluciones. El árbol filogenético de Dawkins fue construido desde un punto de vista antropocéntrico, ya que la única cadena evolutiva completa es la de los ancestros del *Homo sapiens*. Sin lugar a dudas, el real es infinitamente más complejo. Sólo hace falta observar la corta línea que representa a las "plantas + algas" para darnos cuenta de que detrás de cada ramificación hay un mundo infinito.

Casi se puede sentir el bullicio de la vida que hay debajo del simple dibujo del árbol filogenético, de estas líneas, de estos nombres y de estas cifras. Transcribo su mensaje.

En una fecha indeterminada, aunque seguro que antes de hace 1.800 millones de años, se produjo el gran salto desde la célula procariota a la eucariota. Más o menos cuando toda la tierra emergida estaría concentrada en el gran supercontinente Columbia. El núcleo celular ya era una realidad con la que se abrió una oportunidad evolutiva para los organismos que habitaban los mares. La tierra firme permanecía solitaria y sin vida, a la espera.

No sabía que poco después de la aparición del primer protista eucariota iba a ocurrir otro evento crucial que posibilitaría la "Tierra verde": un paso simbiótico dotó a la eucariota de cloroplasto.

Las dos células, con y sin cloroplasto, diferenciarían sus caminos: las primeras, aquella a partir de las que evolucionarían las plantas y algas actuales; y las segundas, madres del mundo de los hongos y de los animales.



Cronología filogenética de los hongos de acuerdo a los estudios de Berbee y Taylor (2017) [1] con un punto de partida posterior al sugerido por Richard Dawkins

Puede resultar curioso que el reino de los hongos sea un grupo hermano del de los animales y no de las plantas. Como estas últimas, están arraigados en el suelo, no se mueven y el alimento lo consiguen in situ. Pero la verdad es que animales y hongos comparten muchas características básicas. Los dos digerimos los alimentos utilizando enzimas, si bien los animales lo hacen en el estómago y los procuran de forma activa, mientras que los hongos viven dentro del alimento y lo descomponen, expandiendo este proceso al crecer sus cuerpos por los alrededores sin necesidad de mudar de lugar. Compartimos más cosas, como el uso de la quitina y el glucógeno, y la presencia de células flageladas, característica muy importante y en donde se apoyan los cladistas para meternos a hongos y animales en la misma cesta, la de los *opistocondos*.

Dejemos por ahora a los hongos, y sigamos la pista al organismo unicelular que tras millones de años nos va a llevar a los animales.

Nuevas habilidades le llevaron a mejorar su motilidad y su capacidad de alimentación. Creció en tamaño y se transformó en algo parecido a una ameba. Durante unos 700 millones de años no hizo más que vivir y dominar las aguas junto a su antigua compañera que evolucionaba hacia el mundo vegetal, y junto a todos los millones de bacterias que habían decidido que ya estaban bien como estaban. Parece ser que hace más o menos unos 1.100 millones de años se despidió de nosotros una célula sencilla hacia su destino como hongo. Era la época en que dominaba otro supercontinente, Rodinia, con una actividad orogénica que produjo los levantamientos de Grenville. Otros biólogos, como Mary L. Berbee y John W. Taylor, apuestan por una diversificación posterior, hacia unos 965 millones de años. La célula aventurera que emprendió el nuevo camino no se podía imaginar que un organismo tan pequeño como ella iba a parir en el futuro a los organismos más grandes que nunca se iban a ver, como el micelio subterráneo de uno de sus tataranietos en Michigan, el monstruo de Cristal Falls, con un tamaño de 15 hectáreas y 100 toneladas de peso.



Spironucleus vortens, un DRIP flagelado parásito intestinal del pez ángel (cortesía de Dr. Sarah Poynton, publicado en Vetbook.wiki, uso libre)

Demos un salto de 150 millones de años hacia adelante. Otra célula recibe el toque de la varita mágica y comienza su camino de

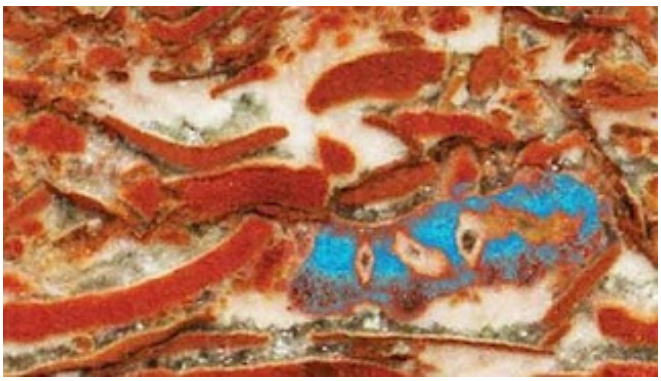
mutación hacia los ictiospóreos (los DRIP's), un pequeño grupo de parásitos unicelulares de los peces y animales de agua dulce, conocidos como *Mesomycetozoea*o *Ichthyosporea*. Sin embargo, en aquel momento la viajera que eligió su propio rumbo vivía en las aguas saladas del océano, y si ya eran parásitos, lo serían de otros seres unicelulares que seguían también su camino.

Pasemos unas hojas más del calendario. Nos adentramos en las profundidades de hace 900 millones de años. Algunos organismos unicelulares habían conseguido mejorar su capacidad de movilidad al disponer de un *flagelo*. Si lo consiguieron fue porque la presión medioambiental favorecía el tener una especie de látigo. ¿Les serviría para barrer más espacio en la búsqueda de alimento? ¿Utilizarían ya algún pigmento fotorreceptor para orientarse? Lo que sí es cierto es que algunos aprovecharon la ventaja para juntarse con colegas, con los que eventualmente formaría *colonias*, como lo hacen los coanoflagelados de hoy en día. Otros encontraron sus oportunidades en otros entornos libres, fuera de las colonias, y siguieron adelante.

Entre los grupos coloniales, alguno supo hallar la ventaja precisa y evolucionó especializando a sus células, mientras seguía fijo en el fondo del mar. Este tipo de solución inició su camino hace unos 800 millones de años, llegando a su perfección con las *esponjas*, el primer organismo multicelular considerado ya animal. Se conocen fósiles de ellas de hasta 650 millones de años.[2]

Al mismo tiempo vivía otro animal similar a un coanoflagelado, con un cuerpo de varias células, que había adoptado una forma *ameboide*, muy pequeño, de tres milímetros quizás. No tenía un eje que le definiera parte delantera o trasera, aunque sí tendría idea de la orientación espacial, y sabría ya lo que es una parte "ventral" ya que se movía reptando sobre una especie de cabellera de pequeños cilios. Estas nuevas habilidades complejas le acercaban a la posesión de un sistema nervioso, pero aún no disponía de él. Apuntaba maneras de depredador como sus actuales

descendientes los placozoos. Corría el entorno de hace 780 millones de años.



Fósiles de esponjas de hace 650 millones de años (Adam C. Maloof et al., 2010, Nature, ver nota 2 a final de capítulo., fair use)

De alguna manera, el pequeño predador encontró también la vía hacia el desarrollo "armamentístico". Se abrieron dos caminos, uno con meta final en los ctenóforos, también conocidos como "peines de gelatina", con una forma muy parecida a la de las medusas y que cazaba utilizando una sustancia pegajosa con la que sujetaba a sus presas. El otro camino comenzó a especializarse hace 700 millones de años, más o menos durante la macroglaciación "bola de nieve", y se basó en los arpones venenosos, los mismos que mucho más tarde vemos que usan las anémonas y corales, y sus parientes las medusas y pólipos, los animales cnidaria. Unos eran animales fijos al suelo mientras que otros podían flotar y moverse entre dos aguas. Supusieron un paso evolutivo muy importante, ya que con ellos se habría inventado la boca/ano, un simple sistema nervioso e incluso algo semejante a ojos.

A una pequeña larva de alguno de estos animales, quizás el primer organismo de clara *simetría bilateral*, le bastó con seguir adelante hacia la vida parasitaria de los gusanos planos, animales sin ninguna cavidad interior que contuviera los órganos especializados. Eso fue hace 630 millones de años, saliendo de otra gran glaciación, con el continente de Panotia formado.

Por la misma época, otra larva siguió caminos más "ambiciosos" hacia los organismos, esta vez sí, con *cavidad interior*, al principio aún con un solo orificio boca/ano y más tarde con ambos diferenciados. 40 millones de años después el pequeño ameboide iniciaría la senda que le iba a transformar en un pequeño gusano. Probablemente con un par de ojos sensibles a la luz y la oscuridad, aunque sin capacidad para formar una imagen nítida. Esto último desde un punto de vista humano, puesto que para el gusano poseedor de este ojo primitivo sería como un milagro de la tecnología. Un pequeño gusano plano, de cuyo descendiente hablaremos cuando analicemos el Cámbrico, que se movía ya por el fondo del mar hace unos 570 años. Aún sin cerebro, aunque con ciertos ganglios nerviosos repartidos aquí y allá, y un rudimentario sistema hidráulico con agua de mar que haría las veces de sistema circulatorio y sangre. Tendría apéndices bucales que le ayudaban a la alimentación y un cuerpo en el que se apuntaba una segmentación, aunque realmente no fuera así. Nadie hubiera dicho que estamos ante el común tatarabuelo de artrópodos, gusanos y moluscos.



Surcos de hace 565 millones de años, posiblemente dejados por un organismo semejante a una anémona, del yacimiento de Mistaken Point, Canadá (Fuente: Geology, ver nota 3 a final de capítulo, fair use)

En Mistaken Point, Terranova (Canadá) se han identificado un total de 70 surcos que indican que algunas criaturas ya se arrastraban por el fondo de los océanos ediacarenses hace 565 millones de años.[3] Las marcas indican que el animal o animales en cuestión tenían algún tipo de control muscular durante su locomoción que les permitía moverse en busca de comida o huir de sus enemigos. ¿Se trataba del mencionado tatarabuelo?

El camino de nuestro pequeño gusano plano se ramificó, iniciando los primeros pasos que le llevarían en un lejano futuro a crear las familias animales que conocemos hoy en día. La *primera rama* se dirigía hacia la aventura de éxito tan variada como la de los **artrópodos** (crustáceos, insectos, arácnidos y escorpiones), **gusanos** y **moluscos**. *Otra rama* se irradió con posterioridad hacia una nueva simetría, la radial, aunque conservando la bilateral en su estado larvario: el inicio del camino de los **equinodermos**, estrellas de mar, erizos y así. Una *tercera rama* de la radiación, y la más moderna, se dirigía resuelta hacia otro "invento" decisivo: la "cuerda dorsal", un cuerpo flexible con forma de vara que se encuentra en todos los embriones de todos los **cordados**, un órgano primitivo del que derivó la varilla semirrígida gelatinosa u ósea que da soporte a muchos animales y que protegerá la principal fibra nerviosa de sus organismos. Tras desgajarse *otra ramificación* hacia los **tunicados** 5 millones de años después, el gusano con notocorda, que se movía nadando igual que un renacuajo, va engrosando la parte delantera de la misma, que adquiere la funcionalidad de un cerebro sencillo.

Entramos en los últimos 560 millones de años, momento en el que se ramifica en el árbol de la vida el proyecto elemental de un ser brillante, semejante al anfioxus actual, un "boquerón" de menos de cinco centímetros, plano, sin cráneo ni cerebro diferenciado, ni mandíbulas, ni esqueleto. Un apunte de cuerda cartilaginosa se alinea longitudinalmente en su parte superior. Un par de puntos con pigmentos fotosensibles que le hacen de ojos y unos arcos braquiales[4] a travésde los que comunicaba el mar con su espacio interior. En sus fósiles se detectan músculos como para nadar con

un movimiento ondulatorio similar a los peces. Bien pudiera ser ésta que viene a continuación la imagen del pariente común de vertebrados y cefalocordados. Seguramente el *Homo sapiens* comparte más de un gen con este fideo marino.

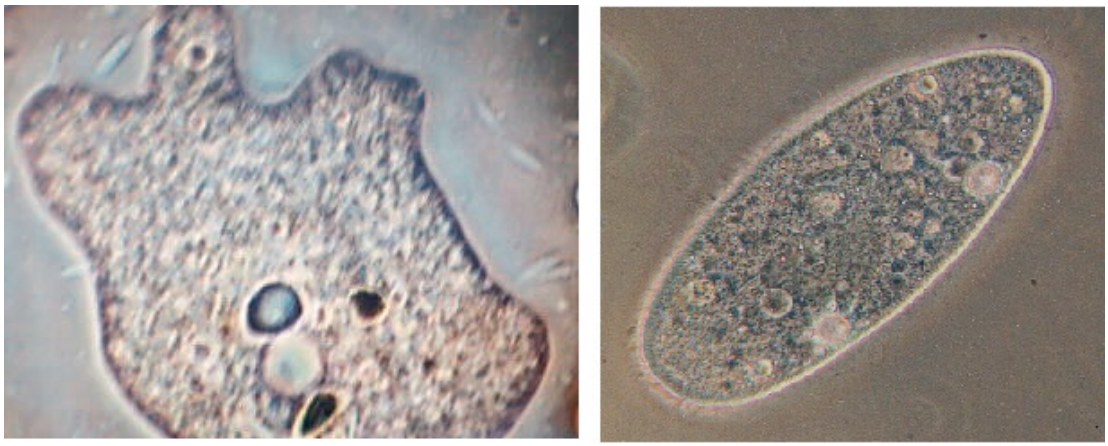


El anfioxus, Branchiostoma lanceolatum, un animal actual que bien puede ser una copia congelada en el tiempo de aquel animal que hace 560 millones de años abrió la puerta a los vertebrados (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

La escena en la frontera del Proterozoico con el Cámbrico

Dejemos el árbol filogenético que nos ha traído hasta ese último abuelo ancestral para fijarnos en lo que realmente pasaba en las aguas de aquella época en que irrumpía el Cámbrico. Desde el final de los episodios de grandes glaciaciones sobre el planeta, la Tierra "Bola de nieve", con la rotura del continente Panotia y consiguiente incremento del vulcanismo la dinámica de los océanos había cambiado. Los elevados niveles de CO_2 habían acelerado la meteorización de las nuevas placas continentales llenando de ricos nutrientes fosfatados las poco profundas aguas entre tierras. El oxígeno también había incrementado su participación en la atmósfera y en las aguas, de forma que la capa de ozono era ya una realidad protectora, por lo que en las aguas someras abundaba el fitoplancton que al morir caía hasta los fondos. La consecuencia es que en los mares había mucha comida,

arriba y abajo. Poco a poco el mundo se vio repleto de vida con multitud de seres que recorrían sus propias sendas: zapadores y pacedores en los fondos; flotadores en la superficie. Y tras ellos los depredadores, preparando en su conjunto un nuevo ecosistema marino que iba a dejar al planeta en la puerta de la aventura de los vertebrados. No había artrópodos, no había plantas superiores. No había aún insectos, aunque su camino había empezado la aventura 30 millones de años antes.



A la izquierda una ameba y a la derecha un paramecio con su orla de cilios (Wikimedia, GFDL 1.2)

Como decimos, los organismos vivos en este momento frontera debían ser abundantes, en su gran mayoría bacterias o pequeños **protozoos** como los habitantes del mundo planctónico, algas, hongos y diminutos protistas, animales moviéndose gracias a sus cilios o mediante deformaciones de sus cuerpos como las amebas. En los fondos comenzaban los arrecifes de arqueociatos, unos animalillos con forma de copa, en donde empezaban a verse corales. Por encima de ellos en la cadena trófica se encontraban las esponjas, de las que se conoce su antigua existencia gracias al análisis químico de rocas que datan de hace 635 millones de años, en las que se ha descubierto una forma modificada de colesterol que es producida sólo por ellas. En estos momentos de bullicio innovador, junto a toda esta biota, quizás en algún recóndito rincón se iba apagando alguna reliquia residual de la fauna Ediacara.

A la esponja se le considera el primer **metazoo**, el ancestro común de los organismos superiores. Está fija en el fondo marino y consta de células que han adquirido una incipiente organización y especialización. Su organismo es completamente poroso y lleno de conductos y cavidades por donde circula el agua, que es absorbida a través de los múltiples orificios exteriores y expulsada a través de una gran abertura superior. El flujo del agua lo llevan a cabo unas células flageladas llamadas coanocitos. En las camarillas internas hay otras células que se encargan de absorber el alimento arrastrado por la corriente de agua, para después pasar a otras células encargadas de la digestión y transporte de nutrientes al resto del organismo. La rigidez estructural la consigue mediante una serie de espículas inorgánicas, cálcicas o silíceas.

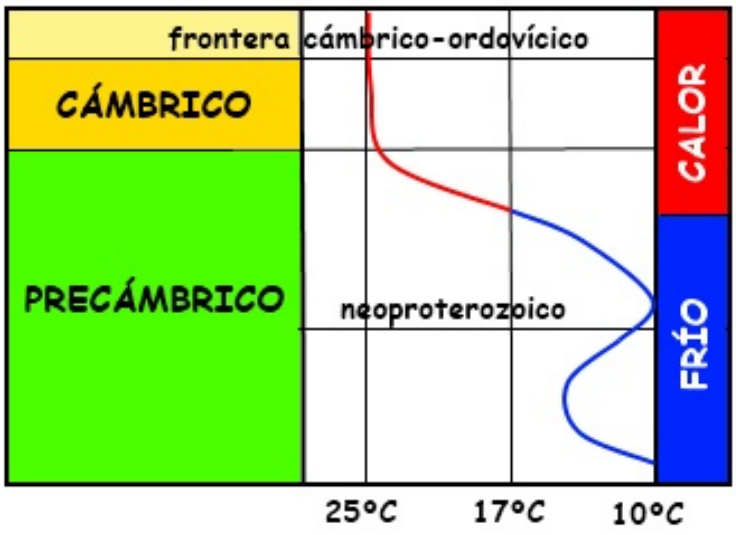


Esponja de mar (Wikimedia, dominio público)

Una de las características más sorprendentes de las esponjas es que la mayoría de las células que componen su cuerpo son "totipotentes", es decir, pueden transformarse en cualquiera de los otros tipos celulares según las necesidades del animal: si se disgregan sus células -cosa que se puede conseguir en el laboratorio por medios mecánicos- y se las vuelve a poner juntas, reaparece de nuevo por si sola una esponja adulta. Es más, si se desmenuzan dos esponjas de diferente especie poniendo el resultado de la "molienda" en un mismo entorno, las células se

reorganizan volviendo a reconstruir dos nuevos individuos separados. Debido a esto se considera que las esponjas sólo mantienen para sus organismos una estrategia basada en una simple *organización celular,* a diferencia del resto de metazoos, que lo hacen por *tejidos*.

Se trata, por tanto, del organismo que culmina el camino iniciado por las agrupaciones coloniales y que abre la puerta del mundo a los Animalia con mayúsculas, como un nuevo reino de los seres vivos. Junto a ellas, bien fijas en el sustrato y posiblemente ya navegando a la deriva, se encontraban las medusas campaniformes y sus primos los pólipos, que evolutivamente se habían dado la vuelta para formar una copa, aferrándose al sustrato del fondo del mar. Y posiblemente les acompañaban también los ctenóforos. Los últimos estudios filogenéticos plantean la eventualidad de que estos pequeños animales gelatinosos, semejantes a las medusas, ocupan una posición evolutiva incluso anterior a la de las esponjas.



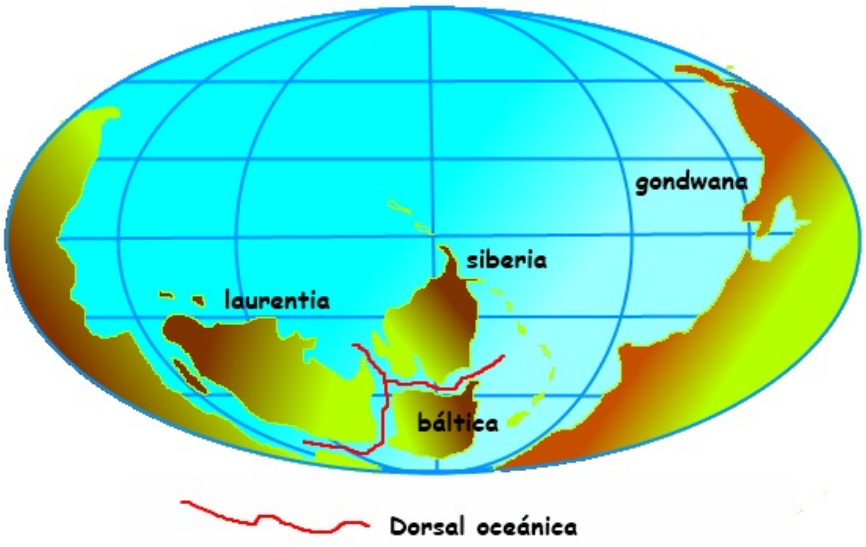
Estimación de temperaturas medias de la Tierra (a partir de Paleomap Project, Ch.R. Scotese,[5] uso libre no comercial)

En estos años frontera se iban entretejiendo alianzas, probando alternativas y aprovechando oportunidades en un mar que cada vez disponía de un mayor contenido de oxígeno disuelto, mero

reflejo del existente en la atmósfera, que había ido creciendo a lo largo de todo el Proterozoico.

En el momento de cambio de eón el clima se había recuperado de los episodios de glaciaciones que recubrieron la Tierra con una capa de hielo, y se disponía a comenzar un largo periodo cálido.

La mecánica de placas seguía modelando los perímetros de las tierras emergidas, haciendo que el antiguo continente de Panotia se hubiera disgregado por su flanco occidental. Tres nuevos continentes iban a la deriva abriendo canales y mares someros entre ellos, una excelente cuna que, unida a la bondad del clima y a los niveles altos de oxígeno, empujarían definitivamente la evolución de la Vida.



PROTEROZOICO TARDÍO 560 MM AA

En este momento de la narración nos encontramos en el punto en el que tenemos que abandonar una era crucial para el desarrollo de la Vida: el Proterozoico. Cuando comenzamos su historia en el capítulo número 10 podíamos haber pensado que este eón era un larguísimo y anodino periodo de la Vida, ya que no íbamos a ver formas complejas, algo así como un periodo en el que se iba a desarrollar un catálogo de intensos acontecimientos pero casi sin relevancia. Hemos estado hablando del micromundo, de organismos unicelulares y de su química. Nada comparado con la

vistosa conquista de la tierra por los tetrápodos, con la exuberante evolución de los dinosaurios o con el misterioso desarrollo del cerebro humano. El Proterozoico acaba "pobremente", con una fauna extinta, la ediacara, y con una fauna minúscula, la de las pequeñas conchas (de las que hablaremos dentro de dos capítulos), y alguna esponja. ¡El inminente Cámbrico, en cambio, eso sí que va a ser un buen espectáculo!

Sin embargo tras un largo viaje de geología, climatología y biología de casi 1.500 millones de años, durante el que hemos hecho muchas incursiones a la teoría de la Vida, comprendemos lo que fue el Proterozoico en realidad: la esforzada concatenación de circunstancias casuales que preparó el atrezo absolutamente necesario para que el Cámbrico y las siguientes eras se lucieran. De los seres procariotas a los eucariotas, de la reproducción asexuada a la sexuada, del pequeño tamaño al grande, del organismo aislado al cooperante, de unas células multifuncionales a células especializadas… todo ello se produjo en el Proterozoico.

Antes de zambullirnos en las exuberancias del Cámbrico, en el siguiente capítulo haremos de nuevo un paréntesis teórico para hablar de ese concepto que ha salido y va a salir tanto en nuestro relato: los árboles filogenéticos de la Vida.

NOTAS DEL CAPÍTULO 16:

1. "*Dating divergences in the Fungal Tree of Life: review and new analyses*", John W. Taylor y Mary L. Berbee (2017).
2. Como se ha reportado en éste artículo de la revista Nature de agosto de 2010. "*Possible animal-body fossils in pre-Marinoan limestones from South Australia*", Adam C. Maloof et al.
3. En este artículo de la revista Geology de agosto de 2009 podéis leer el detalle de esta información. "*First Evidence for locomotion in the Ediacara biota from the 565 Ma Mistaken*

Point Formation, Newfoundland", Alexander G. Liu, Duncan Mcilroy y Martin D. Brasier.

4. Se conoce como **arcos branquiales** o **arcos faríngeos** a las estructuras a modo de hendiduras, situadas a ambos lados de la faringe, que se originan durante el desarrollo embrionario de los animales del filo Cordados. Pueden permanecer en el individuo adulto, como en el caso de las lampreas, o sólo ser plenamente funcionales en estado embrionario.
5. **Paleomap Project**

   [*http://www.scotese.com/climate.htm*]

   es una interesanísima web en donde se presenta diversa información paleogeológica, paleoclimática y mapas.

17. Fin del Proterozoico. Paréntesis filogenético

A lo largo de los capítulos anteriores nos hemos paseado por unos 4.000 millones de años de biosfera. Hemos contemplado cómo a través de un camino continuo la simple química de átomos y moléculas se iba convirtiendo en algo cada vez más complejo que llamamos bioquímica y, a fin de cuentas, Vida. Desde un principio los elementos primordiales seguían escuetamente en sus interrelaciones los dictámenes de la segunda ley de la Termodinámica, buscando siempre una situación de estabilidad que encontraban en estructuras que comportaban un mínimo de energía. Pero la creciente complejidad les llevó a formar intrincados sistemas químicos en los que la anterior estabilidad termodinámica ya no era el objetivo final. Sin faltar a la segunda ley mencionada, estos sistemas adoptaban comportamientos dinámicos que los llevaban hasta posiciones que rozaban la inestabilidad, en donde se mantenían gracias a una nueva habilidad adquirida: gestionar la energía.

Así, de una química de estabilidad termodinámica pasaron a una química de inestabilidad dinámica, en donde se premiaba la eficiencia en el mantenimiento de la maquinaria. Quien lo hiciera mejor sobreviviría más. Quien más habilidades obtuviera, lo que se plasmaba en una mayor complejidad y un mayor orden interno, podría jugar con ventaja. Se pasó de la química "conformista", en donde la "ambición" de los actores era la mínima energía, a una química activa en donde la "ambición" de los sistemas era sobrevivir más que el vecino en un entorno donde funciona la replicación y la competencia. Y esta química activa, sin lugar a dudas, perdió su identidad y se confundió con la Vida. Lo ha expresado de forma perfecta el biólogo australiano Addy Pross en un libro que recomiendo: "*What is Life?: How Chemistry Becomes Biology*".

Hasta ahora el viaje a lomos de la Química nos ha llevado desde el organismo más elemental hasta el que poseía ya unas habilidades tales como la multicelularidad e incluso la especialización de sus células en tejidos funcionales. Parece como si ya quedara poco, tan sólo unos 542 millones de años.

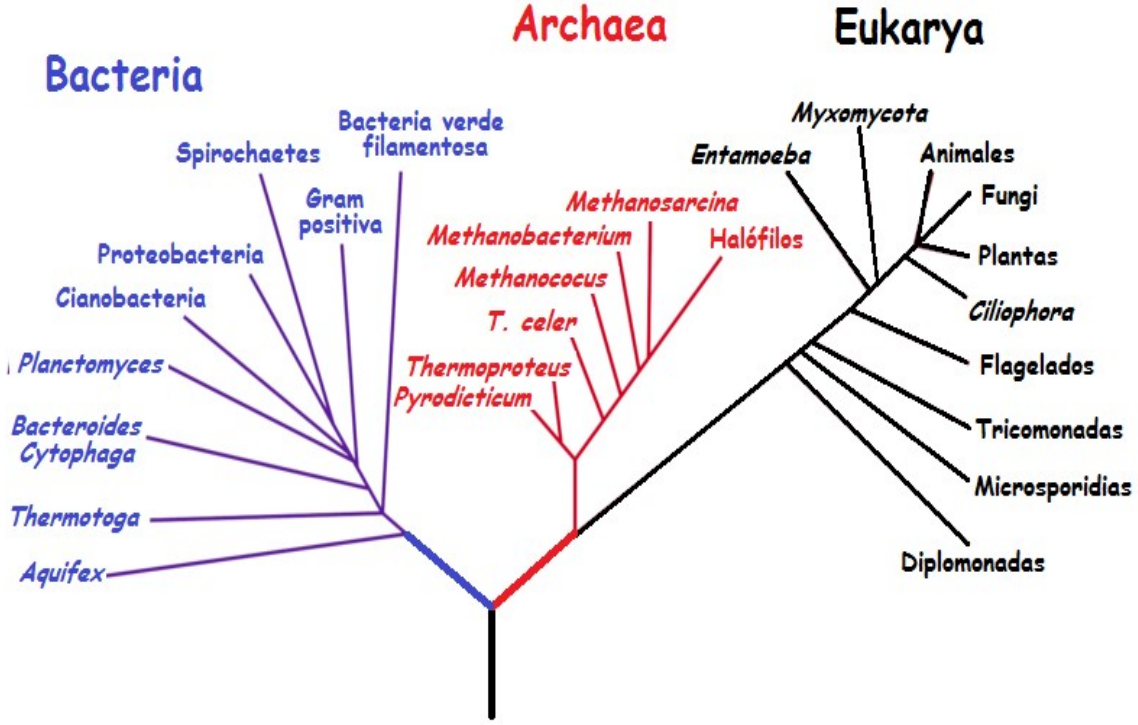
Pero no va a ser así. Nos queda mucha historia por delante. En el último eón, el Fanerozoico, con sus 542 millones de años, no sólo pasaron muchas cosas y se desarrollaron muchos avances, sino que por suerte hay muchas pistas de lo que pasó. El registro fósil, dada lógicamente la "juventud" de los restos, es muy abundante. Pero voy a dejar el hilo de la curiosidad en el aire.

Antes de entrar en el detalle de esta época de florecimiento exponencial, voy a hacer un nuevo paréntesis teórico, que espero os guste por su importancia en la descripción y desarrollo de esta ciencia que es la Paleontología. Hoy nos dedicaremos a dar unas pinceladas sobre la **clasificación filogenética**.

Nos encontramos a finales del Proterozoico cuando ya se había tramado una red de divergencias evolutivas, como nos enseñó Richard Dawkins en el capítulo anterior, que nos llevarán a las formas animales actuales.

Con aquellos mimbres y mediante la selección de los que mejor se iban adaptando a las presiones ambientales, la Evolución con mayúscula podía iniciar las tareas de completar **el árbol de la Vida**, hasta ahora compuesto simplemente por las ramificaciones de las familias bacterianas. Se habían asentado las bases necesarias para que comenzara a expandirse el abanico de las especies, ampliando, complicando, haciendo cada vez más espesas las ramificaciones, cubriéndolas de nuevos brotes verdes… y secando a la mayoría de ellos. Se estima en mil millones el número de especies que han vivido desde los inicios sobre la Tierra, aunque tan sólo conozcamos unas 300.000 especies fósiles y sólo diez millones las que la pueblan hoy.

Los brotes finales del árbol filogenético son las especies. El **concepto biológico de *especie*** lo definió el notable biólogo alemán Ernst Mayr ya en 1942, según el cual una especie es un grupo natural de individuos que pueden cruzarse entre sí, pero que están aislados reproductivamente de otros grupos afines. Él mismo reconoció que esta definición entraba de refilón para definir a organismos asexuados, pero el concepto tal como lo estableció ha tenido un gran éxito y es el que entiende casi todo el mundo.



Árbol filogenético de la Vida (Wikimedia, dominio público)

El afán clasificatorio de los humanos nos ha llevado a intentar encontrar el orden en los seres vivos. Carlos Linneo fue posiblemente el primero que lo consiguió de forma inteligente, dejando sus ideas en el libro *"Systema naturae"* (1758).[1] Muchos han seguido a Linneo, y a medida que el conocimiento se hacía mayor, las bases de clasificación se han tenido que ir cambiando. Y como en toda actividad humana, en este campo también ha habido una viva polémica sobre cómo se deben clasificar los organismos vivos que son y que han sido. De todas formas no vamos a entrar en este detalle pues creo que es intrascendente para nuestros propósitos.

Lo realmente importante es que, a pesar de las divergencias y a pesar de lo que costó aceptar que bacterias y arqueas tenían historias evolutivas bastante distintas, hoy en día se maneja una división de los seres vivos en tres **Dominios**: Bacteria, Archaea y Eukarya. La figura anterior representa un reconocido árbol filogenético basado en esta última clasificación. A partir del próximo capítulo sobre el Cámbrico comenzaremos a ver y a disfrutar de la actuación del magnífico rol de actores que coronan su copa.

Un árbol filogenético como el anterior no tiene nada que ver con la datación exacta de la aparición de especies, sino que su objetivo simplemente es clasificar según el momento de aparición en escena, dando una idea de quién es el antecesor y quién el que le sigue. El punto de inicio es la base de un tronco común por donde deambuló un ser vivo padre universal de todos los siguientes, para con posterioridad irse expandiendo en múltiples ramificaciones que representan también el historial de ancestros comunes. Es sorprendente la gran importancia de las bacterias en este árbol, que se difuminan si en vez de Dominios hablamos de las antiguas clasificaciones según **Reinos**, que suman seis: a los dos de las Bacterias y Arqueas, las eucariotas añaden cuatro más: Protistas (básicamente eucariotas unicelulares), Hongos, Plantas y Animales.

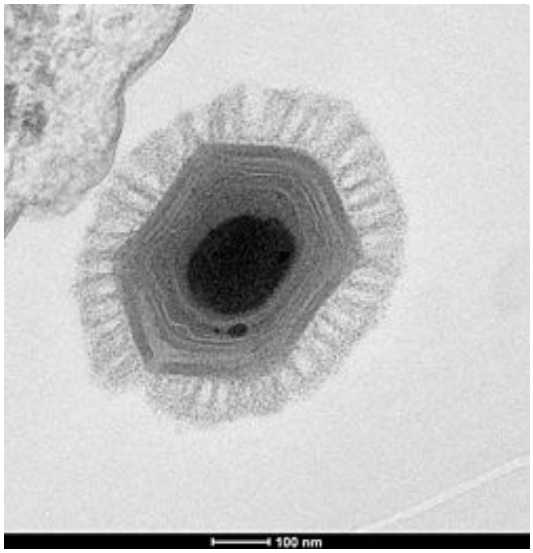
Haré una mención a la categoría de división que queda inmediatamente por debajo de Reino, ya que es un concepto importante que asomará en los siguientes capítulos en los que se desarrollará la "explosión de vida" ocurrida en el Cámbrico temprano. Se trata de los **filos**, las agrupaciones de animales basadas en su plan general de organización corporal, es decir, atendiendo a los planos constructivos de detalle de sus cuerpos. Aunque hay unos cuarenta filos, la mayoría de animales se encuentran en cuatro de ellos. Los artrópodos agrupan el 80% del total de especies, los moluscos un 7%, los cordados, entre los que nos encontramos los vertebrados, un 4,5%, y los gusanos de todo tipo otro 4,5%. En estos cálculos, las bacterias procariotas no

entran. Injustamente, el ser pequeño e invisible no da muchos puntos en el ranking de la popularidad.

Pero la Vida es una caja de sorpresas. La clasificación está definida pero, como todo en el mundo de la ciencia, nada es inmutable. Los últimos estudios sobre unos extraordinarios seres conocidos como **Macrovirus** o virus gigantes apuntan a que la amable figura del árbol filogenético quizás deba hacer un hueco a tan extraordinario personaje, hasta hoy fuera del club de los organismos vivos.

Los virus son unas pequeñas máquinas que están en el límite entre el ser vivo y un sofisticado gadget bioquímico, aunque el pensamiento más común es que realmente son esto último. Para entenderlos hay que saber que se les puede describir en pocas palabras como una molécula genética, tipo ARN, y una cápsula exterior proteínica que le sirve de nave espacial. En su ARN está la codificación para su propia replicación, pero no es capaz de sintetizar por sí mismo las enzimas necesarias para ello. Curiosamente sí es capaz de organizar la síntesis de dos familias de proteínas, una, con las que fabrica su cápsula exterior, y otra, con las que perfora las paredes de otras células y penetra en sus núcleos. Claramente navega, se ancla sobre una célula, la penetra y engasta su material genético en el ADN de la célula hospedadora. Allí su ARN se replica a la par del ADN de la célula (y gracias a éste), comenzando a sintetizar proteínas dañinas para el hospedador, con las que construye nuevos virus hijos que salen del citoplasma de la célula para reiniciar nuevos periplos.

Lo sorprendente empezó durante el estudio de un brote de neumonía en Inglaterra, allá por los inicios de los 90’s del siglo pasado. Buscando la bacteria causante se encontró a *Bradfordcoccus*. En microbiología clínica se utiliza la pista de la macromolécula ADN ribosómico 16 S *para identificar bacterias*: es el recurso más sencillo. Pues bien, nuestra amiga *Bradfordcoccus* carecía de esta pieza de material genético. Misterio, misterio. Entonces, al observarla con más precisión, los patólogos se percataron de que no era una bacteria sino un virus.

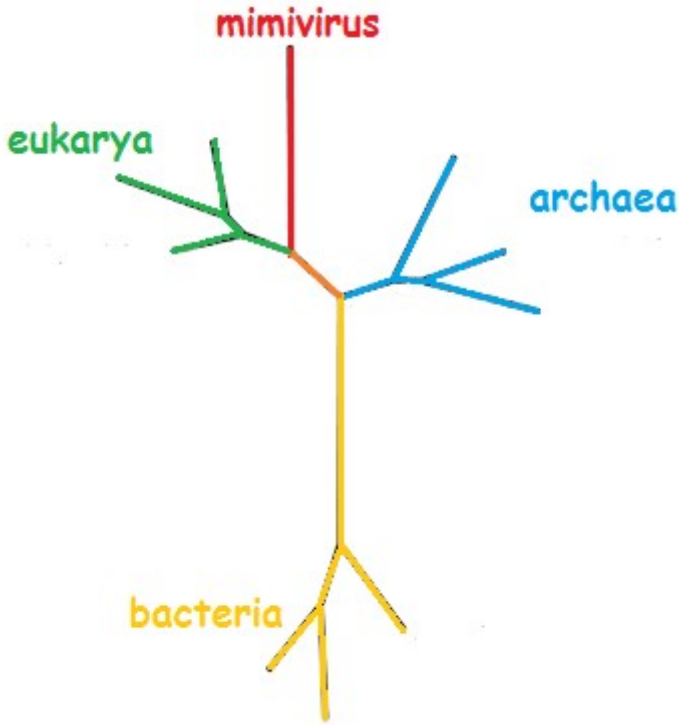


Megavirus chilensis (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Con posterioridad se han descubierto seres semejantes, como el *Mimivirus*, el *Megavirus*, el *Pithovirus* o el CroV. Pero estos "señores" aún sorprendieron más: a pesar de ser considerados virus, ellos mismos eran capaces, con su propio ARN, con sus propios genes, de codificar funciones que siempre se habían considerado propias de las células, sintetizando a través de ellos diversas proteínas: nada más alejado a lo que es un virus.

El problema es ¿cómo consiguieron estos virus gigantes los genes que les facilitaban tales funcionalidades y que no les correspondían? Hay varias interpretaciones. Una dice que por transferencia horizontal de genes,[2] tal como hacen muchas procariotas. Otras, que durante un proceso de simbiosis, de mecanismo semejante al que creó a las mitocondrias, fue perdiendo la práctica totalidad de su genoma quedando como lo que ahora vemos. Esta última interpretación resulta la más probable.

Todo ello necesariamente ha suscitado un debate científico para tratar de explicar el origen de los virus gigantes y la necesidad de redefinir lo que es un "virus". Incluso algunos autores afirman que corresponderían a un cuarto dominio de la Vida. Quién sabe si en un futuro el árbol de la Vida presentará un nuevo aspecto. Como el siguiente:



Árbol de la vida con cuatro dominios

¿Donde queda el hombre? Desde la lejanía que nos da la perspectiva del Proterozoico, resulta claramente meridiana nuestra posición en el árbol filogenético de la Vida: un pequeño brote, que ni está dibujado, de una pequeña rama del reino Animal, en el dominio Eukarya. Un brote que se pierde en el inmenso mar de los números. Transcribo al naturalista Colin Tudge de su libro "*The variety of life*":

"El número de especies que han vivido en la Tierra desde que comenzó la Vida fácilmente puede llegar a la cifra de… 4 millones de millones… prácticamente mil especies por cada año de existencia de la Vida sobre la Tierra. Desde luego esta estimación puede estar equivocada en un factor de un orden de magnitud, o incluso por varios órdenes de magnitud. Pero incluso si la cifra fuera exagerada un millón de veces, el total sigue siendo inmenso, demasiado vasto para ser aprehendido por ninguna mente humana".

Una especie perdida entre millones de ellas, esto es el *Homo sapiens*.

Puesto correctamente el foco, abramos ahora el zoom: llega el Fanerozoico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 17:

1. Ya Pedro habló de él en la entrada "*Carl Linneo*" de la serie "*Hablando de…*" del blog El Tamiz (2010).
2. La **transferencia genética horizontal** es el movimiento de material genético entre organismos unicelulares y/o pluricelulares, que no es a través la transmisión vertical (la transmisión del ADN de padres a su descendencia).

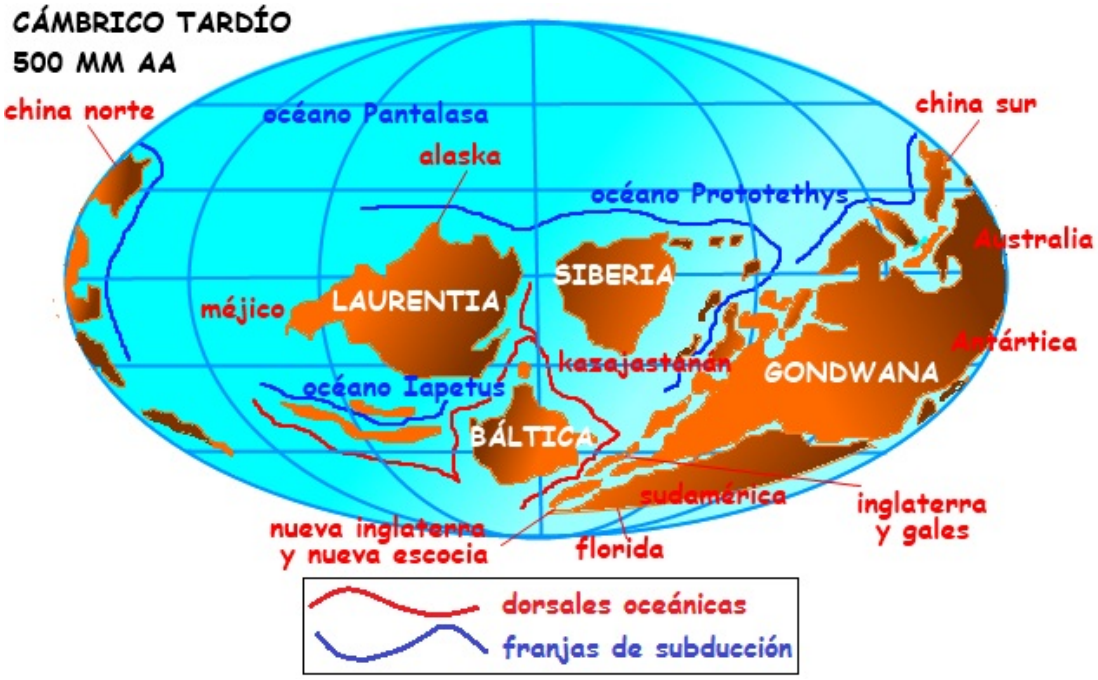
18. La biota del Cámbrico

Llevamos ya en nuestras alforjas un extenso periodo de tiempo de 4.038 millones de años, que agrupa a los tres primeros eones de nuestro planeta. A partir de hoy ya sólo vamos a movernos por el último de ellos, el Fanerozoico, el cual iremos despiezando con más meticulosidad dada la cantidad de información que disponemos de este periodo. No en balde es la etapa más próxima y por tanto con más datos disponibles.

El Fanerozoico se divide en tres grandes eras, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, siguiendo el orden geológico de más antigua a más moderna. Cada una de ellas, a su vez, se divide en periodos. En este capítulo comenzaremos con el primero del Paleozoico: el Cámbrico, que se prolongó desde hace 542 hasta hace 488 millones de años.



Los primeros restos geológicos de esta época se estudiaron en Gales, por eso le nombraron Cámbrico pues en gaélico a Gales se le llama Cambria. El continente Panotia se estaba descomponiendo y la rica fauna Ediacara había desaparecido dando paso a la "explosión" de unas nuevas formas de Vida con características que se han prorrogado hasta la época actual. Los organismos son exclusivos del mar: bacterias, hongos, plantas y animales. Estos últimos van a descubrir el uso de materiales sólidos para crear protección y aportar sostén a sus blandos organismos.



La ruptura de Panotia y posterior deriva continental hizo que en esta época hubiera un gran continente, **Gondwana**, en posición ecuador-polo sur, del que se habían desgajado por el oeste los continentes de Laurentia, Siberia y Báltica, en posiciones ecuatoriales y tropicales, que llevaban su propia deriva de separación motorizada por una dorsal oceánica en forma de Y invertida. Toda la costa norte de Gondwana era una zona de subducción en donde iban creciendo arcos de islas volcánicas.

No se sabe muy bien cuál pudo ser el clima del Cámbrico aunque se supone que tuvo temperaturas cálidas, ni muy altas ni muy bajas. Los abundantes sedimentos calizos parecen asegurar esta situación climática. En todo el periodo no hay evidencias de glaciaciones, lo cual refuerza la hipótesis de temperaturas benignas.

La Vida continuaba en los mares. Sus fondos más profundos estarían recubiertos de sedimentos silíceos y calcáreos. En la proximidad de la línea costera estaba el roquedal, firme o disgregado. Los arrecifes hacía tiempo que habían aparecido en la franja de aguas tropicales en donde habían adoptado formas globulares, de abanico o tubulares, más o menos delicadas según la profundidad. Al comienzo de esta época estaban formados por

esponjas o animales parecidos, arqueociatos y algas calcáreas. Más tarde a estos tres tipos de organismos se les unirían los corales. Se seguían construyendo formaciones de estromatolitos, aunque ahora no con tanta facilidad debido a que alguno de los nuevos animales que iban apareciendo ya comenzaba a alimentarse de sus capas bacterianas. La fauna Ediacara había desaparecido hacía unos millones de años y no se disponen de muchos restos fósiles que la enlacen con la cámbrica. Quizás podamos considerar a los individuos de los géneros *Parvacorina* y *Springgina* como los que firmaron la transición, y que suponemos pudieron ser los ancestros de los trilobites, unos artrópodos de la gran explosión de vida a la que estaba llegando. Sabemos también que las esponjas estaban allí, pero no mucho más. A lo mejor la vida estaba constituida por seres de cuerpo blando, con una probabilidad muy baja de fosilizar, o eran microscópicos. O quizás aún nos falta por descubrir el yacimiento fósil definitivo que complete la línea evolutiva.



Spriggina flounensis, animal de finales del Ediacárico que se postula como enlace con los artrópodos del Cámbrico (Wikimedia, CC BY 2.5)

Los fondos marinos y las orillas someras debían estar cubiertos de tapetes bacterianos y de algas. Se acepta de manera general que no existían plantas sobre la tierra en esta época. Aunque la datación molecular nos sugiere que las plantas terrestres más simples se segregaron pronto del árbol evolutivo, en el Precámbrico, hace unos 700 millones de años, y los hongos hace 1.000 millones de

años, también en el Precámbrico. Es posible que un manto formado por hongos, algas y líquenes ya cubriera ciertas zonas de la Tierra. Muchas incógnitas y mucho por descubrir de la Vida en estos momentos.

En poco tiempo el panorama cambió.

La expansión de la biosfera

A principios del Cámbrico se produce una tremenda y rápida diversificación de formas vivas. Un fenómeno que hoy se sabe fue de carácter global en todo el planeta y que se produjo a lo largo de un periodo geológicamente mínimo: unos diez millones de años. Se la conoce como **la explosión del Cámbrico.**

A través de un juego de éxitos y errores, que iban siendo permanentemente calibrados por criterios evolutivos, se inventaron nuevas estrategias de alimentación, pasando de pacer microorganismos al azar a una búsqueda activa del alimento. Los niveles de oxígeno en las aguas habían sobrepasado el límite necesario para que los organismos pudieran metabolizar colágeno, proteína fundamental para disponer de un organismo rígido y flexible: la fauna ediacara podía ser superada. También con esos niveles de oxígeno los organismos podían aprovechar el calcio y el silicio disueltos en el medio para usos particulares casi inéditos. Los organismos se van a ir haciendo más complejos que las sencillas esponjas. Recordemos sus flagelados coanocitos. La naturaleza aprovechó la oportunidad de fortalecer los simples cilios, incluso uniéndolos formando una membrana que sería vibrátil, con lo que se inventaba un sólido aparato locomotor: la carrera armamentística para la predación acababa de hacer acto de presencia.

El buen clima y la fuerte disgregación de terrenos continentales estaban favoreciendo la precipitación de calizas en los mares y el "envenenamiento" de sus aguas con iones perjudiciales para el metabolismo, lo que impulsó a los organismos vivos a desarrollar un bombeo de estos minerales fuera de sus cuerpos. Por este

procedimiento a algunos se les fueron desarrollando en su superficie escamas y espículas calcáreas o silíceas que inicialmente les ayudarían a protegerse. Quizás como subproducto, y gracias a que en el proceso pudo generarse un diseño mecánico que acabó formando esqueletos tanto internos como externos, la acumulación de iones contribuyó a mejorar los elementos de sostén y a que la movilidad pudiera realizarse con mayor soltura. Al permanente espolvoreado calizo y silíceo de las aguas se le unió el aprovechamiento de biopolímeros tales como la quitina y el colágeno. Caparazones, cáscaras, espículas, tejidos más consistentes, cartílagos… aparecieron por doquier durante el Cámbrico. Fue el inicio de una gran carrera armamentística: a un predador más hábil le sucedía una presa más protegida, que obligaba a incrementar las habilidades de los predadores… y así en continua progresión. Patas, ojos, mandíbulas… un sinfín de nuevas armas. Éste fue *el gran motor de la expansión de vida en el Cámbrico*: se pasó de esperar a que el alimento viniera gratuitamente a buscarlo activamente.

Los primeros escalones de la cadena alimentaria comenzarían en las algas y los tapetes bacterianos, entre los cuales pulularían pequeñas larvas de animales. Los suelos oceánicos estarían repletos de limos con detritos, restos de la vida que sobrenadaba. El plancton flotante o suspendido entre dos aguas había sido abundante con anterioridad. Pero en estos momentos estaban apareciendo nuevos animales con ojos para decidir dónde ir, con asomo de mandíbulas masticadoras que les permitían pacer en las praderas submarinas, animales con rudimentarias paletas con las que escarbaba en el limo, seres con facilidades para reptar o nadar que cubrían cualquier nicho en donde pudiera haber alimento. Gusanos que se enterraban en el fango, gusanos con numerosas cerdas móviles, artrópodos acorazados y con terribles "mandíbulas", cefalópodos ágiles y voraces, todos conviviendo con los estáticos moluscos.

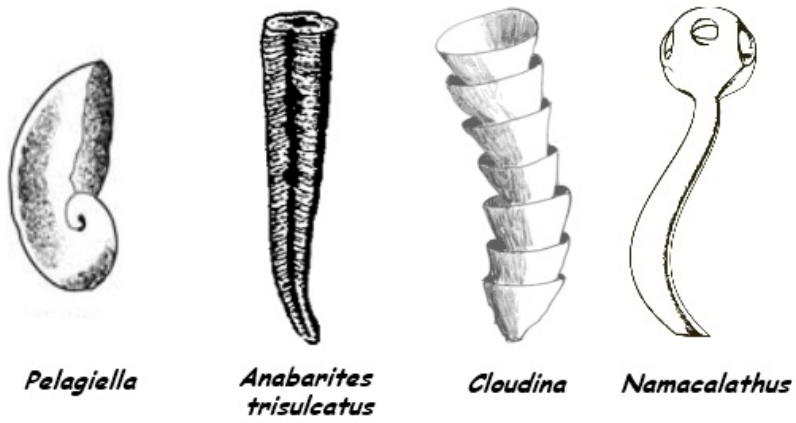
Según comenta el paleontólogo norteamericano Stephen Jay Gould acerca de la explosión del Cámbrico, parece como si en aquel

momento la Vida manifestara libremente su potencial, haciendo realidad un inmenso abanico de posibilidades, todas con exquisita funcionalidad. Realmente fue como abrir una caja de sorpresas en donde se encontraban almacenadas una gran variedad de piezas dispuestas para ser utilizadas, para diseñar y montar cada una de las partes vitales de un organismo: cien formas de boca, cien de patas, cien de cabezas… mézclese y tómese una de cada y hágase un animal cámbrico. Las variantes montadas que sean viables encontrarán su encaje en el medio ambiente adoptando un hábitat particular y una posición en la cadena trófica. Desde el fondo marino a las aguas intermedias, desde ser detritívoros a ser auténticos depredadores. Una panoplia completa. Y todo en el "suspiro" de tan sólo diez millones de años.

Parece como si en aquel momento cualquier solución, en cuanto a formas y funciones, que tuviera posibilidad de éxito era inevitable y tenía que surgir espontáneamente en la naturaleza. Es el sino de la evolución ya que sin duda el esplendor de la variación siempre se repetirá, con mayor o menor ímpetu, tantas veces como lo ordenen las circunstancias de cada momento. Algo parecido a lo que estamos viendo durante el Cámbrico sucedió unos 500 millones de años más tarde en el Cenozoico, cuando África, Sudamérica y Australia navegaban a la deriva como inmensas islas solitarias. Sobre sus geografías las faunas de mamíferos, en unos casos placentarios y en otros marsupiales, evolucionaron de forma independiente y ¿sorprendentemente? casi siempre adoptando soluciones convergentes. En cada uno de estos continentes la evolución llevó a colonizar nichos semejantes con animales de fenotipos semejantes y ello sin tener ninguna conexión familiar inmediata. El lobo euroasiático y el lobo de Tasmania, el topo y su homólogo marsupial, el oso hormiguero y el numbat marsupial australiano, el armadillo sudamericano y el pangolín afroasiático, y así muchos más ejemplos. La Vida es una activa maquinaria llena de iniciativa que en donde encuentra un resquicio, allí se instala.

Es muy posible que todo se originara con los **Pequeños Fósiles con Concha** (*Small Shelly Fossils*) conocidos también como la

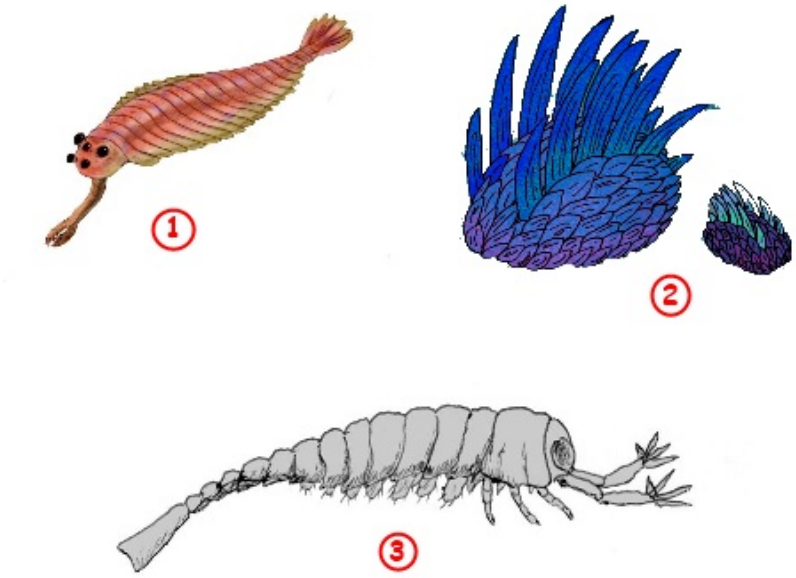
fauna Tomotiense. Prácticamente son los primeros restos de esqueletos mineralizados que aparecen en el registro fósil, al comienzo del período Cámbrico. Los restos consisten en escamitas, espículas, tubos y conchas, que bien pudieran ser elementos de organismos mayores en una época de esqueletización temprana, aunque otros parecen ser conchas individuales pertenecientes a organismos de pequeño tamaño. Seguramente las rarezas estructurales de esta fauna corresponden a planes corporales que aparecieron rápidamente y murieron igual de rápido sin dejar supervivientes, como ya les había sucedido a los organismos de Ediacara. De hecho, vimos en el capítulo número 15 que, al igual que estos últimos, se extinguieron coincidiendo con una excursión negativa del $\delta^{13}C$.



Variedad de los Small Shelly Fossiles (de izquierda a derecha, a partir de Fossil.wiki, Paleos.com, ambos fair use y wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más allá de esta pequeña fauna las formas más avanzadas de organismos vivos se conocen en gran medida gracias a unos pocos yacimientos extremadamente ricos en fósiles. Uno de los más importantes es la "catedral" de Burgess Shale, en la Columbia Británica, en Canadá, sobre las laderas de las Montañas Rocosas, que contiene fósiles con antigüedad comprendida en la franja de 540 a 530 millones de años atrás. En aquellos momentos sólo el noreste de Canadá asomaba la nariz por encima del agua en el continente de Laurentia. El resto era el mar. Burgess Shale es un verdadero cuerno de la abundancia de formas animales, gracias a la

que sabemos mucho de la fauna del Cámbrico. Artrópodos, cordados, gusanos, esponjas y otros animales desaparecidos.



Fauna de filos encontrados en Burgess Shale que en la actualidad no tienen representantes vivos: 1-Opabinia, 2-Viwaxia y 3-Yohoia (Wikimedia, GFDL 1.2)

Lo mismo podemos decir del yacimiento formado por los esquistos de Maotianshan en China. Su antigüedad es de 522 millones de años y en aquel momento la región estaba sumergida en la línea del ecuador. El inicio de su investigación es posterior a la de Burgess Shale y por tanto aún quedan muchos misterios por descubrir, aunque, como en el yacimiento canadiense, la diversidad es asimismo fantástica.

Los múltiples estudios realizados a partir de estos yacimientos han dejado encima de la mesa de la evolución una gran pregunta: ¿Cómo en tan poco tiempo, geológicamente hablando, aparecen todos los planes de diseño corporal de los organismos, entre ellos los mismos, y no más, de los que vemos en los animales de hoy en día? ¿Por qué en los siguientes 525 millones de años no se han innovado nuevos diseños y sólo se han modificado los que aparecen en los yacimientos del Cámbrico? ¿Por qué aparece el tipo de fósiles que aparece? ¿Cuáles fueron los eslabones

contemporáneos de la fauna ediacara o de la de las pequeñas conchas, ambas extintas, que llegaron hasta las formas complejas del Cámbrico?

Hay teorías que explican esta rápida expansión de la diversidad apoyándose en el argumento de la presión de la predación y la competencia. El hecho de que hubiera cada vez más formas de animales complejos, que se iban armando defensiva y ofensivamente de forma progresiva, hizo que la biosfera animal buscara múltiples soluciones y salidas a esta presión, haciendo evolucionar rápidamente desde las formas simples los múltiples y diferentes planes estructurales, lo que llamamos filos, de los organismos de comienzos del Cámbrico.

Podríamos pensar también como idea general que a partir de un espacio vacío es más fácil el rellenarlo. No obstante algunos expertos se resisten a pensar, como es el caso de S. J. Gould, que el éxito de la "explosión" fuera tan sólo consecuencia del estado "virginal" y sin contaminación histórica en que se encontraba el medioambiente cuando todo se inició. Esto sólo sería una parte. En capítulos posteriores de esta serie veremos que se dieron grandes extinciones, como la del Pérmico-Triásico en la que desaparecieron casi el 95% de las especies marinas, tras las que sabemos que la biosfera quedó casi despoblada, por lo que podemos pensar que de nuevo se habría generado un estado casi "virginal". Y lo que es cierto es que después de este repetido barrido y casi puesta a cero no se observa ninguna nueva explosión de diversidad. Por tanto, no está tan claro que el extraordinario impulso que se produjo en el Cámbrico fuera sólo consecuencia de que los nichos ecológicos se quedaron vacíos, en una situación donde entonces pudo manifestarse la Vida con toda su potencialidad.

Debieron concurrir además otras circunstancias. Los genes de los pocos animales que iniciaron el camino tras el fracaso de los ediacarenses, debían mantener unas interrelaciones más sencillas que la que mantienen estos mismos tipos de genes hoy en día. Sus duplicaciones en el ADN con el paso de los millones de años y el

posterior cambio funcional, enmarañó e hizo más dificultosas sus formas de expresión. Sin embargo, en aquella época debían ser más "libres", estar menos condicionados, y por tanto con un alto potencial de expresar un variado escaparate de realidades. Por otro lado, el hecho de haber tenido que ser tan pocos los animales progenitores en las generaciones iniciales del Cámbrico nos permite pensar que el acervo genético de la época era "escaso" y compartido por todos los organismos que iban surgiendo de nuevo: todos dispondrían de parecidas estructuras de expresión fenotípica. De ahí la gran mezcla de soluciones particulares entre todos los nuevos modelos animales de inicios del eón Fanerozoico. Multitud de filos que compartían soluciones estructurales, a veces en distintas partes de sus organismos, dentro de unos patrones corporales que no tenían nada que ver unos con otro: patas articuladas, ojos articulados, cuerpos articulados, antenas articuladas.

Después de estos 10 millones de años iniciales ya no hubo más inventiva, sólo aniquilación de aquellas formas a las que en cada momento biogeológico las circunstancias les iban poniendo el cartel de "menos adaptadas". Como ya hemos comentado, hoy en día hay muchos menos filos que los que se conocen a partir de los fósiles de la biota del Cámbrico. Menos pero también más singulares, en el sentido de que ahora prácticamente no se repiten fuera de un filo aspectos particulares de su fenotipo. Es como si la continua poda del árbol engendrado a principios del Cámbrico hubiera abierto tales huecos entre sus ramas que ya unas no se reconocen en las otras: gusanos, moluscos, artrópodos, braquiópodos, cordados… realmente son estructuralmente muy distintos.

El genetista John Maynard discurría al hilo de lo anterior que una vez establecido el escenario con tal riqueza de formas, no le quedó más alternativa que ir simplificándolas. En un medio con un catálogo de filos abarrotado, para que surgieran otros nuevos o bien tenían que aparecer a partir de mutaciones en los existentes, o bien tenían que surgir de nuevo, de la misma forma como lo habían

hecho los ya existentes, es decir, a partir de células simples u organismos primitivos muy sencillos. En el primer caso, es decir, a través de mutaciones en los filos existentes, el salto de un filo a otro parece muy improbable dadas las diferencias tan grandes que hay entre los diseños de cada uno de ellos, de forma que la macromutación que hubiera llevado de uno a otro se hubiera hecho inviable. En la segunda hipótesis, la generación de nuevas estructuras desde escalones iniciales también parece improbable, ya que la competencia de los organismos más complejos, con una historia a sus espaldas y ya bien establecidos, anularían por selección natural a las nuevas aventuras. Así que a la biosfera animal sólo le quedó el camino del ajuste por regresión y disminución de variedad, como así ha sucedido.

La opinión de S. J. Gould se entrecruza con la de J. Maynard, a la vez que se apoya también en la ya comentada progresiva regresión de los grados de libertad de los genes. A medida que iban pasando los millones de años y la selección natural iba "cazando" a los que se despistaban, fueron quedando unos pocos cada vez más especialistas de sus nichos medioambientales, ya que en ello les iba la vida. Estos filos seleccionados, estos organismos con genes bien interrelacionados que les habían llevado al podio de la biota se encontraron con las manos atadas por su superespecialización, lo que les hacía muy difícil expresar grandes mutaciones. Así que el árbol fue proyectando sobre el horizonte unas ramas cada vez más potentes… y cada vez más escasas. Queda como la gran duda para Gould el determinar si las circunstancias que iban colocando a un determinado filo como último de su rama, al alcance de las tijeras podadoras de la selección natural, fueron en cada momento consecuencia de mil causas azarosas o bien resultado de un camino inevitable y predestinado. De los veinticinco filos fósiles catalogados en Burgess Shale sólo cuatro perduran entre nosotros, filos éstos que sin lugar a dudas no tenían por qué ser necesariamente los mejor preparados, más que los otros veintiuno. Fueron los triunfadores porque las cartas les vinieron de cara.

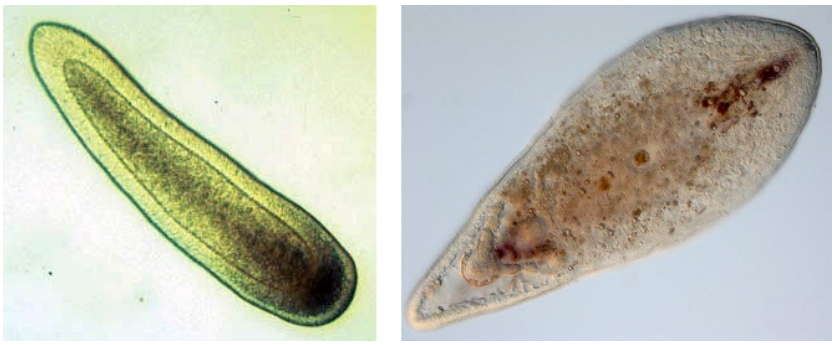
La historia evolutiva del Cámbrico

Aquellos mares de hace más de 500 millones de años no eran muy distintos a los de ahora. Poblados por las mismas líneas familiares de animales de hoy en día, pero con otros cuerpos. Nos hace pensar que aquellos animales, hoy fosilizados, también provenían de otros antecesores de los que no sabemos mucho. Entre las antiguas bacterias y ellos se extiende un casi vacío del que sólo podemos especular con los datos de los que disponemos: ya sean *morfológicos*, extrapolando e imaginando parecidos entre los escasos fósiles y sus tataranietos que hoy en día viven, o bien *de tipo genético*, mediante análisis moleculares de proteínas o del ADN de sus parientes actuales –o de fósiles, aunque esta molécula se degrada con facilidad- buscando semejanzas de genes y hasta cuánto se parecen con sus descendientes actuales y entre ellos. El hecho de que los primitivos protistas tuvieran el cuerpo blando de difícil fosilización no ayuda a seguir las pistas. Pero vamos a intentarlo.

¿Cuál pudo ser el guión de esta película? Rebobinemos un poco el celuloide y vayamos de nuevo a los últimos momentos del Precámbrico. Como ya hemos comentado, el árbol filogenético se abrió exageradamente durante aquel periodo. Por los registros fósiles vemos que casi al comenzar el Cámbrico las esponjas continuaban con una fuerza vital extraordinaria, mientras que las medusas y pólipos ya se buscaban la vida. No serían muy distintos de sus parientes actuales.

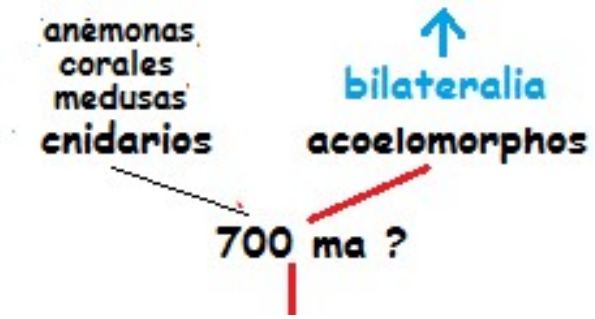
Hoy en día los dos últimos, medusas y pólipos, prácticamente comparten un mismo tipo de larva, llamada plánula, ciliada y nadadora, que tiene simetría bilateral. Puede optar por tener una vida libre flotando en el mar o bien anclarse en una roca del fondo. En la siguiente imagen podemos descubrir su anatomía no muy diferente a la de la imagen contigua, que sorprendente no es la de otra plánula sino la de un *Acelomorfo*actual. El paso ancestral de una a otra forma, de una larva de medusa a un animal bilateral, bien pudo ser debido a un proceso de “pedomorfismo”, palabra

muy rara pero que sólo quiere decir que en algunos casos el momento de la madurez joven/adulto se va retrasando, pero no así la madurez sexual que se mantiene en el tiempo, de forma que en algún momento los animales reproductores maduros evolucionados llegan a fenotipos que mantienen la morfología juvenil de sus antepasados. Este pudo ser el mecanismo de enlace, unido también a un proceso de evolución convergente, entre los primitivos habitantes que sobrepasaron desde el Proterozoico la frontera del Cámbrico y los más básicos bilaterales sobre los que se gestó la fauna de la "explosión", los antepasados de todos los animales actuales.



Plánula de vida libre (izquierda) (intrabiodev.obs) y Acelomorfo (derecha) (Fuente: Dr Bernhard Egger, UCL.)

Al actual *Acelomorfo* se le consideraba hasta hace poco un diminuto gusano platelminto, un pequeño ser que **se encuentra en la base de los animales bilaterales**. Actualmente se le ha asignado un filo propio separado del de los platelmintos por lo que toma más énfasis la frase anterior. Eso quiere decir que un tatarabuelo suyo posiblemente fuera el ancestro común de todos los bilaterales, la mayoría de los animales de hoy en día, y el primero de ellos que constituyó filo propio.

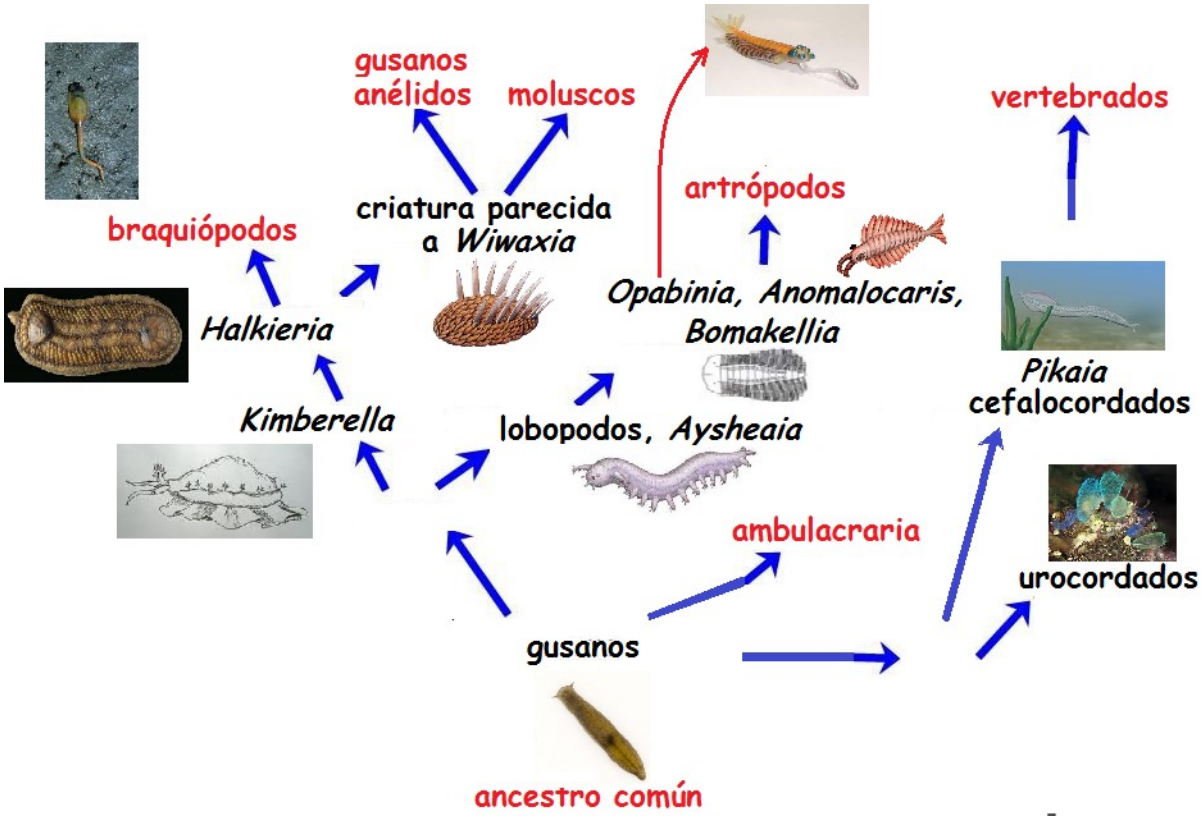


Si acudimos de nuevo al árbol filogenético de Dawkins presentado ya hace dos capítulos, el 16, y hacemos un zoom sobre el momento del inicio de los animales bilaterales, nos encontramos con el anterior esquema que nos permite asegurar la cercanía evolutiva de ambos filos:

Como podemos observar Richard Dawkins teoriza que el momento del inicio de la gran aventura, cuando se dio la separación entre cnidarios y acelomorfos, pudo haber sido hace ahora unos 700 millones de años. A partir de aquel momento un ser parecido a la plánula, ciliado y plano, con simetría bilateral, estaba predestinado a ser el patriarca de todo el pueblo animal que le sucedió. Y se tuvo que esperar unos 110 millones de años de remodelación desde este animal y su descendencia para llegar a un diseño, aunque primitivo, más acorde con nuestros patrones habituales: lo imaginamos como un gusano con simetría bilateral, primo de los platelmintos, con un extremo que hacía de cabeza, en el que se abría el orificio de entrada al estómago. Tendría también unos ojos rudimentarios, apéndices bucales que usaba para alimentarse, un cuerpo que apuntaba ya hacia una segmentación, aunque realmente no era así, y algún tipo de ornamentación corporal. "*Dawkins dixit*".

Este tipo de humilde espécimen nos recuerda a la contemporánea Planaria y sería el cabeza de serie, el ancestro común, de la fauna del Cámbrico. Vamos a ir ahora por barrios, guiados por el siguiente plano callejero con el que hoy en día se encuentran más confortables todos los informes de genética molecular.

Esto se pone interesante. La figura con la que se cierra el capítulo es la hoja de ruta que vamos a seguir a lo largo de varios capítulos a partir de éste. En el próximo nos atreveremos a analizar el inicio de todos los animales de semejante hoja de ruta. Nos esperan los artrópodos, braquiópodos, moluscos, anélidos y vertebrados… en definitiva, los principales filos de la biosfera.



Caminos evolutivos de los especímenes de la fauna del Cámbrico. La imagen del ancestro común corresponde a una Planaria actual

19. Los filos del Cámbrico

Tengo que advertir que desde este capítulo, y alguno que le siga, voy a abandonar el planteamiento cronológico de los hechos, siguiendo el paso del discurrir geológico tal como hasta ahora. La explicación es sencilla: aprovechando el impulso que nos ha dado en el capítulo anterior el esplendor de las radiaciones del Cámbrico, creo que viene como anillo al dedo abrir en este momento una serie de paréntesis en los que se vaya analizando paso a paso, independientemente de su duración temporal, cada uno de los diversos caminos que siguió la biota en pos de la rica complejidad de formas que surgieron en el entorno de este periodo.

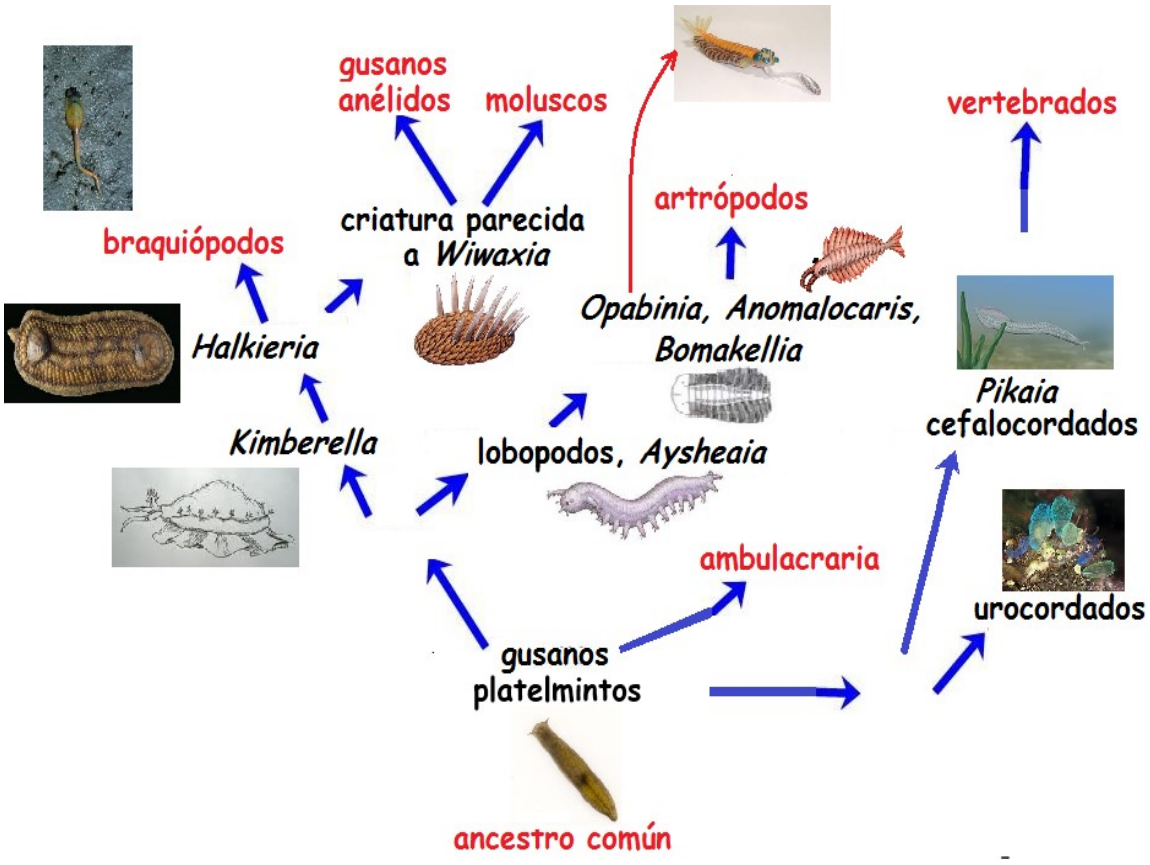
Es obligado, por tanto, poner el foco sobre diferentes sucesos evolutivos de gran trascendencia de forma que podamos entenderlos y ver, por ejemplo, cómo pudieron aparecer la simetría bilateral, la notocorda, el aparato locomotor o el ojo, entre otros.

La claridad en el desarrollo argumental de cada uno de estos importantísimos aspectos de la evolución de la Vida exige a su vez una vida cronológica propia para cada uno de ellos. Así que nos moveremos desde el Precámbrico y a lo largo del Fanerozoico siguiendo el desarrollo evolutivo de cada uno de ellos, por lo que la sucesión de periodos se irá repitiendo al compás de cada nuevo monográfico.

En el capítulo anterior comentamos la expansión acelerada de nuevas formas de seres vivos en lo que se conoce como la explosión del Cámbrico. En aquellos momentos, hace unos 540 millones de años, se iniciaron los principales filos de animales que hoy podemos observar: artrópodos, braquiópodos, moluscos, anélidos o vertebrados. La evidencia fósil durante el Cámbrico es clara para todos ellos.

Un preludio dedicado al gusano platelminto

Continuamos ahora hablando de cómo pudieron iniciar la andadura cada uno de ellos, desde los albores en el Cámbrico hasta periodos posteriores. Debió ser algo así como una actual Planaria la que inició el árbol genealógico. Y como elemento que ayude a seguir la saga, vamos a repetir el árbol con el que cerrábamos el capítulo anterior.

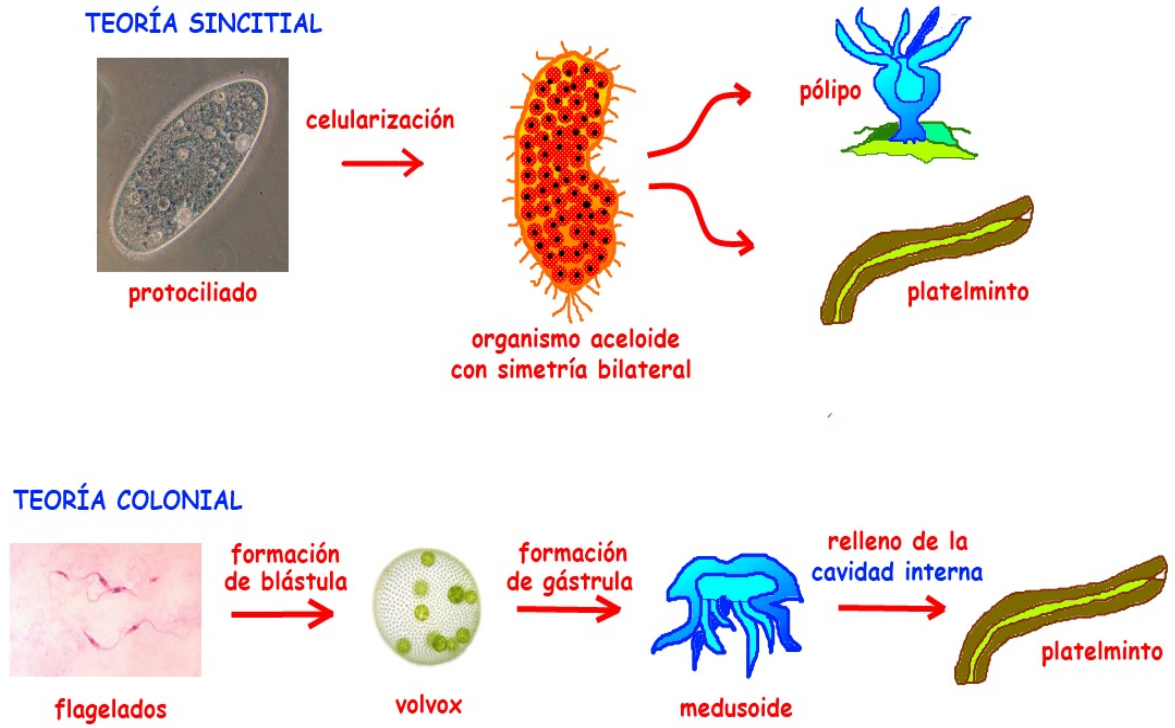


Caminos evolutivos de los especímenes de la fauna del Cámbrico. La imagen del ancestro común corresponde a una Planaria actual. (a partir de imágenes de wikimedia)

En el esquema de la figura anterior hemos dado un paso evolutivo añadido a la existencia de la Planaria, ya que en él vemos una raíz única personalizada en un gusano platelminto. Por su posición de posible padre común de los principales filos de los metazoos actuales, bien se merece que le dediquemos una breve genealogía.

El biólogo Robert D. Barnes postulaba tres posibles vías por las que se llegó al primer organismo del Reino Animalia. Una de ellas parte de un animal ciliado, como el paramecio, que duplicó multitud de núcleos en su citotoplasma y que con posterioridad los aisló mediante nuevas membranas.

El resultado sería un organismo pluricelular. Dado que muchos de los ciliados actuales presentan simetría bilateral, bien pudo ser que el ancestral ciliado que pasó a multicelular adoptara esta simetría, transformándose en un platelminto (*teoría sincitial*).



Evolución de los metazoos primitivos hacia el gusano platelminto, según las teorías de Robert D. Barnes

La segunda teoría se apoya en los flagelados unicelulares. En un capítulo posterior nos encontraremos con el caso del alga Volvox, y veremos cómo estos flagelados se agrupan formando unas esferas huecas. Con el tiempo estas esferas pudieron sufrir una invaginación conformando una línea de organismo de tipo medusa, para después rellenar su cavidad interna con nuevas células de sus paredes, transformándose a la larga en un platelminto (*teoría colonial*).

Por fin, una tercera hipótesis es más generalista, ya que postula un paso evolutivo no especificado que transformó a algún ser unicelular en un platelminto.

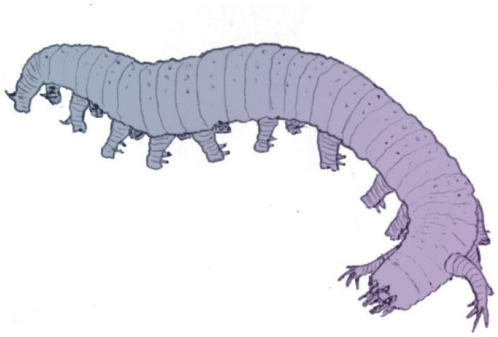
Lo anterior nos lleva a lo que ya hablábamos en el capítulo anterior al analizar el árbol filogenético del Proterozoico, en donde comentábamos cómo las plánulas y los acelomorfos podían estar en la base de los animales bilaterales, y en consecuencia en la base de los platelmintos, los primeros de ellos.

Sigamos ahora con el hilo principal atendiendo al filo de los artrópodos.

El camino de los artrópodos

Más allá de 536 millones de años atrás, un cuerpo cilíndrico con unos apéndices que se pueden clasificar como patas buscaba su vida protegido entre las colonias de esponjas. Unas patitas que básicamente eran una funda de músculos llenas de un líquido, que podríamos asemejar funcionalmente a la sangre, y que servían para moverse: los lobopodos.

El primer fósil lobopodo se llama *Aysheaia pedunculata y tenía espinas en sus patas que le servían para recolectar comida de los tapices bacterianos.* A menudo disponían de numerosas placas blindadas que cubrían todo el cuerpo y la cabeza. Pero como eso les dificultaba la defensa, desarrollaron espinas. *No se parecía a un artrópodo, pero iba camino de ello.*



Reconstrucción de Aysheaia pedunculata (Wikimedia, GFDL 1.2)

De los *Lobopodia* pasamos a *Diania cactiformis*. Se trata del primer ejemplar con **patas articuladas** típicas de los artrópodos. Es el primer *Lobopodia* con un exoesqueleto simple. La criatura que vivió hace unos 520 millones de años medía 6 centímetros de largo. El fósil no muestra signos de la existencia de ojos o mandíbulas, pero tiene 10 pares de patas articuladas. Se cree que estas patas tenían una superficie dura no muy diferente de las que hoy recubren los miembros de crustáceos o insectos. Se alimentaba del plancton y del *detritus* orgánico del fondo marino, y la armadura de sus patas probablemente se desarrolló como protección frente a los primeros depredadores.



Recreación de Diania cactiformis (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)



Fósil del trilobites Phacops rana (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Y del *cactiformis* al trilobites y la familia artrópoda. Evidentemente el tránsito se hizo a través de varios escalones,

pasando por la exoesqueletización del cuerpo y la aparición de los ojos. Del trilobites se hablará un poco más en la descripción del Ordovícico.

Hace unos 515 millones de años ya se observan en los artrópodos unas morfologías semejantes a la de una gamba de hoy en día, es decir, bivalva en la parte dorsal y cuerpos segmentados acabados en un par de aletas. Algunos de sus fósiles nos han dado una gran información sobre la reproducción de estos animales. Se trataría de *Kunmingella douvillei* uno de cuyos especímenes, que procede del yacimiento chino de Maotianshan Shale, lleva en su interior huevos aún no fecundados. Un poco posterior es *Waptia fieldensis* especie de la que cinco de sus fósiles encontrados [1] en Burges Shale, datados en 508 millones de años, portaban, éstos sí, huevos con embriones protegidos bajo su bivalva, lo que indica que esta estructura facilitaba su transporte, permitiendo el cuidado de las crías. Seguramente son las madres más antiguas de las que tenemos conocimiento.

Emparentado con los artrópodos vivió el extinguido *Anomalocaris*, la "gamba anómala", el rey de la depredación del momento, hace de 525 a 510 millones de años. Siempre se ha creído que su visión debía aterrorizar. Podía medir hasta un metro de longitud y se movía con gran agilidad gracias a los numerosos lóbulos laterales y a los tres que conformaban su cola. El cuerpo articulado poseía un exoesqueleto orgánico. Aunque realmente lo que debía impresionar era la visión de su cabeza, con dos grandes apéndices llenos de espinas con los que atrapaba a sus presas y se las llevaba a la boca donde los trituraba, ya que en ella disponía de un montón de láminas aserradas.

Los últimos estudios de sus fósiles realizados en 2009 por el paleontólogo del Museo de la Naturaleza y la Ciencia de Denver, **James W. Hagadorn**, parecen dar más luz a sus hábitos alimentarios, ya que determinan que la disposición de su boca no permitiría ejercer una fuerza suficiente como para romper caparazones duros como el de los trilobites, y que quizás tuvieran

una forma de alimentarse más generalista con un amplio abanico de hábitos alimentarios, desde depredador acechando a la emboscada hasta realizar una criba de sedimentos en busca de carroña o diminutos restos orgánicos.

El *Anomalocaris* lo tendría todo controlado mediante un par de ojos compuestos, tipo yunque, que le daban una visión clara de la que se aprovechaba para cazar con precisión en las bien iluminadas aguas de los mares cámbricos. Para procesar esa información tenía que haber desarrollado ya un cerebro en consonancia. Esta hipótesis no resulta sorprendente, puesto que hay pruebas moleculares que indican que las estructuras clave del cerebro humano datan de hace más de 600 millones de años.



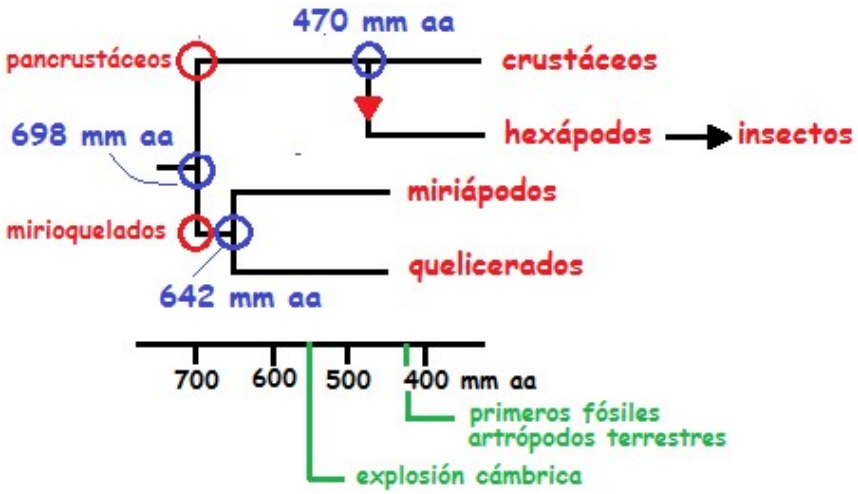
Representación artística de Anomalocaris saron depredando trilobites (Wikimedia, GFDL 1.2)

No obstante, no todas las especies de este artrópodo eran tan terroríficas. Recientemente (2014) se ha comunicado el descubrimiento [2] en un yacimiento de Groenlandia de un "especial" anomalocárido de hace 520 millones de años, *Tamisiocaris borealis*. Sus apéndices frontales habían desarrollado

la forma de una red, con la que efectuaba algo así como una pesca de arrastre, atrapando por filtración plancton de hasta medio milímetro de tamaño. Se cree que esta especie adoptó esta solución para su alimentación en respuesta a la competencia que suponía el entorno de gran presión depredatoria del Cámbrico, lo que les obligó a cambiar de nicho ecológico.

Habrá que esperar hasta la frontera del Silúrico con el Devónico, unos cien millones de años después (416 mm aa), para que los artrópodos dejaran el agua y conquistaran la tierra, abriendo el nuevo mundo de los insectos, arañas, escorpiones y miriápodos.

El esquema de abajo indica la correlación filogenética entre los diversos subfilos de los artrópodos, en donde se muestran los momentos de las divergencias entre ellos. Está basada en estudios [3] realizados en 2009 por el biólogo Davide Pisani sobre las secuencias de genes nucleares y mitocondriales de estos animales.



Aparición y diversificación de los artrópodos (de acuerdo a los estudios de Davide Pisani, 2009)

Los resultados son discrepantes en cuanto al punto de partida temporal de este filo con los que dimos al hablar del Proterozoico, cuando presentábamos la cronología filogenética basada en la información del libro "*The ancestor's tale*" (2004) de Richard Dawkins, en donde el punto de divergencia de los artrópodos se

situaba unos cien millones de años más tarde. El esquema de Pisani amplía la información, pudiéndose observar el parentesco tan próximo entre crustáceos e insectos, que quedan enlazados por un hexápodo ancestral que apareció por evolución de un crustáceo en un ambiente de agua dulce cuando aún no se había conquistado el medio terrestre.

El camino de los braquiópodos

Por la misma época en que los artrópodos comenzaban su carrera de éxito, hace unos 555 millones de años habitaba el fondo marino un extraño animal ovalado, bilateral, que al igual que una babosa se encogía y alargaba para moverse en una dirección: el *Kimberella.* Sus restos fósiles se han encontrado en el yacimiento australiano de Ediacara y con posterioridad en la región rusa del Mar Blanco. Estaba recubierto por un tegumento no mineral, firme pero flexible, que no le impedía el movimiento, formado por una especie de pequeñas escamas que se hacían más duras a medida que el animal crecía, y le rodeaba una especie de volante que haría las funciones de agallas rudimentarias.



Representación artística de Kimberella (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más tarde, hace unos 525 millones de años, el *Kimberella* convivía en el mar con otros seres, quizás uno de ellos el *Halkieria,* un animal con cuerpo plano y simetría bilateral, con un "vientre" liso y pegajoso como el de una babosa. Se movía por el fondo marino mediante este vientre mucilaginoso. Su parte dorsal estaba

protegida por escamas huecas ancladas a la espalda mediante un tallo, formando una especie de armadura.

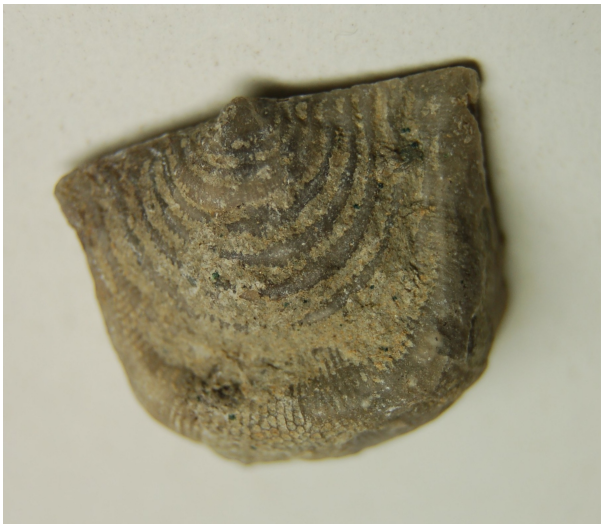
Y lo más curioso es que sobre la espalda, en sus dos extremos, acarreaba dos conchas parecidas a valvas, la posterior muy semejante a la de los braquiópodos del Cámbrico. Una posible explicación de por qué desarrolló esta extraña morfología es que le era sumamente útil cuando se veía atacado: se plegaba por la mitad, más o menos protegido dentro de las dos placas. Como la predación en su época era la norma, quizás la evolución le llevó a adoptar definitivamente esta forma, doblada, anclándose en un lugar. Se trata de la *Halkieria evangelista.*



Fósil de Halkieria evangelista. Se aprecian claramente las dos valvas que protegían ambos extremos de su cuerpo (Wikimedia, GFDL 1.2)

Después de contemplar a *Halkieria* es casi inevitable el sospechar el siguiente paso. ¿No parece creíble que la cadena evolutiva "gusano Platelminto-Kimberella-Halkieria" nos deba llevar hasta los Brachiopoda? A la vista de la imagen siguiente no es difícil imaginar a un braquiópodo como un Halkieria doblado en posición defensiva.

Los braquiópodos se diferencian de los moluscos bivalvos en que sus dos conchas presentan una disposición de superior/inferior, unidas en la región posterior, mientras que en los moluscos son bilaterales (derecha/izquierda).

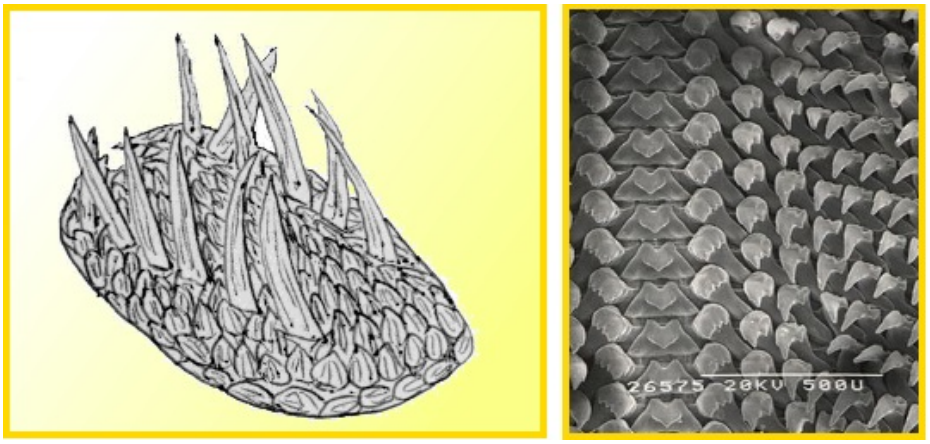


Fósil del braquiópodo Leptaena acuticuspidata (Consejería Educación Junta de Andalucía, fair use)

El camino de los moluscos

Ya hemos hablado del *Kimberella* como posible ancestro de los braquiópodos. Pero también lo fue de los moluscos, según los estudios genético-moleculares. Junto a sus fósiles *se encuentran marcas* muy similares a las que hacen los moluscos cuando raspan con sus rádulas, su característico aparato alimentador. Aunque en algún caso, como el de los especímenes encontrados en los yacimientos rusos del Mar Blanco, ninguno presentaba signos de poseer rádula.

También la mencionada *Halkieria*, ornamentada con una valva en cabeza y otra en cola, está en el camino de los moluscos a través de *Viwaxia*. Ambos tienen puntos en común, una base blanda tipo babosa mediante la que se desplaza, y escamas huecas con una misma estructura microscópica y ordenadas también en tres zonas. Pero Viwaxia había dado un paso más. Es el animal más antiguo que conocemos con rádula.



Representación artística del Viwaxia y, a la derecha, rádula de un molusco actual (Wikimedia, GFDL 1.2)

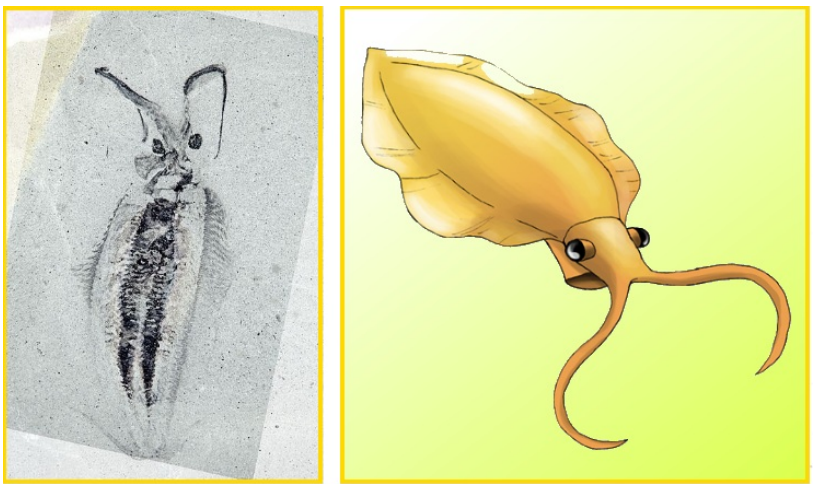
Más allá de estos animales se encuentra lo que pudiera ser el primer molusco, el aplacóforo. Literalmente significa "que no lleva concha". Tiene apariencia de gusano recubierto de espinas calcáreas. Se supone que por fusión de estas espinas se llegó a la concha de los verdaderos moluscos. Bien pudiera ser que las escamas de Viwaxia pudieran sufrir un proceso semejante.



El aplacóforo Epimenia verrucosa (Wikimedia, GFDL 1.2)

El *Nectocaris pteryx*, un animal fósil de hace 500 millones de años, era un antepasado carnívoro de los calamares y por tanto el antecesor más antiguo que se conoce de los moluscos cefalópodos. Un reciente estudio revela que *Nectocaris* era similar a los

miembros del conocido grupo moderno de los cefalópodos -que incluye pulpos, calamares, sepias y nautilus, así como los ya desaparecidos ammonites y belemnites perdidos en pasadas extinciones masivas.



Fósil (Wikimedia, dominio público) y representación artística de Nectocaris pterix (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los especímenes fósiles, de entre dos y cinco centímetros de largos, muestran que *Nectocaris* tenía forma de cometa y se aplanaba desde la cabeza a la cola. Tenía un par de ojos pedunculados y un par de tentáculos largos para atrapar las presas que consumía. Se cree que esta criatura utilizaba sus aletas laterales para nadar y, como los modernos cefalópodos, también usaba una tobera en forma de embudo para acelerarse mediante propulsión a chorro.

El camino de los anélidos

Aquí tenemos que seguir acudiendo a *Viwaxia*. Los poliquetos actuales son gusanos anélidos con una apariencia peluda o espinosa. Los pelos se llaman quetas y están mineralizados: la microestructura de estas quetas es idéntica a la de las escamas de *Viwaxia*. Y todavía hay más conexiones: *Canadian*, un gusano anélido de los poliquetos, cuenta con una concha quitinosa en uno de sus extremos. Sorprendentemente, un espécimen de *Viwaxia* presenta también en un extremo una especie de concha que le

emparenta con su antecesor *Halkieria*. Y no sólo la relación se da en la morfología de las conchas de poliquetos con las de *Viwaxia* y *Halkieria*, sino que los análisis moleculares así parecen avalarlo.



El poliqueto actual Nereis succinea (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

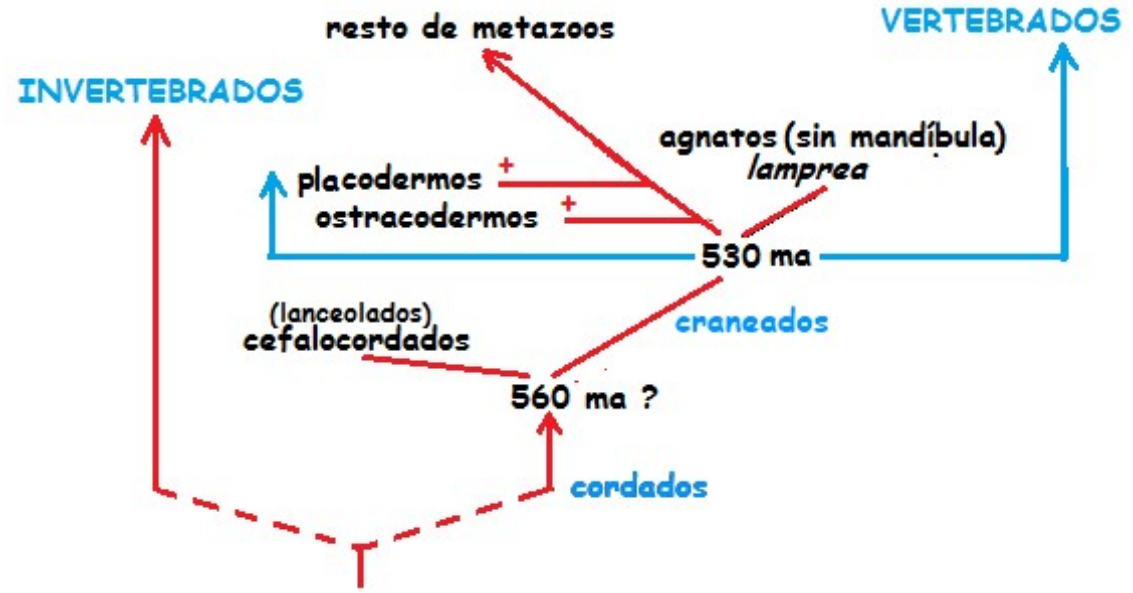
El camino de los vertebrados

La historia de los vertebrados empieza con el invento de los cordados durante el Cámbrico. La corda, estructura que les da nombre, es una varilla que se extiende a lo largo del cuerpo y que tiene una rigidez suficiente como para proporcionarles un sostén. Se sitúa en posición dorsal con respecto al tubo digestivo.

Un grupo de investigadores del instituto médico norteamericano Howard Hughes afirma en un reciente estudio (2014) [4] que la notocorda evolutivamente procedería de estructuras musculares que habrían desarrollado animales aguas arriba del árbol filogenético cordado. Posteriormente este "fleje" muscular denominado axocorda desarrollaría un bastón central cartilaginoso, elemento que daría mayor eficiencia a la natación (tal como se observa en el moderno anfioxo).

Comienza la saga con unos fósiles encontrados en el yacimiento de Maotianshan Shales, en China, datado en el bajo Cámbrico de hace 525 millones de años. En él se han encontrado, entre otros, restos de animales que parecían iniciar la línea de los peces: el

Haikouella, un "gusano" cartilaginoso que poseía ojos, intermedio entre los invertebrados. Se trata aún de un primitivo cordado.

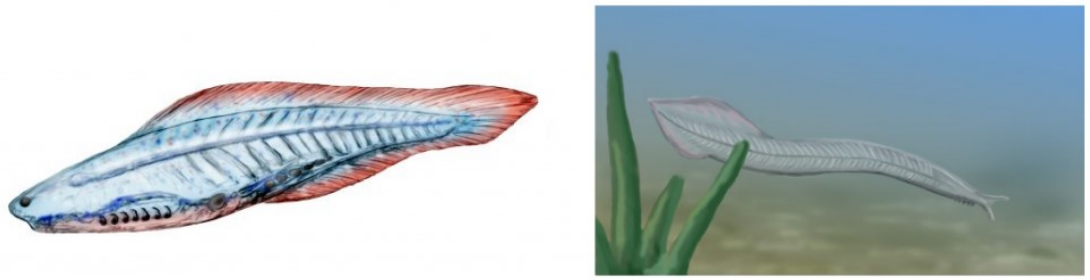


Árbol filogenético según Richard Dawkins

El *Haikouella* tenía notocorda, hendiduras branquiales por las que absorbía agua y cribaba los alimentos y arcos branquiales, que son pequeñas barras cartilaginosas entre las hendiduras branquiales. Son particularmente importantes estas características ya que representan la primera evidencia de un armazón, aunque cartilaginoso, que sustentaba longitudinalmente al cuerpo y que con el tiempo derivaría hasta la columna vertebral de los vertebrados. Evidencia una estructura de hendiduras y soportes gelatinosos cuyo diseño es semejante al que presentan los peces y al que tienen los embriones de los tetrápodos durante su desarrollo inicial. Con posterioridad veremos que estas estructuras son las que conformaron los huesos, nervios y músculos de la cara y cuello de los mamíferos. Sin duda el *Haikouella* es el ancestro más remoto con un plan corporal precursor, y además ya similar al nuestro.

También en los yacimientos chinos de Maotianshan Shales se ha encontrado el *Haikouitchtys* (el mismo nombre le delata, "pez de Haikou"). Parecido a *Haikouella* aunque ya había iniciado el camino de la especialización encontrándose clasificado en el subfilo craniata, los craneados. Contaba por tanto con una

estructura craneal, quizás el más antiguo cráneo descubierto hoy en día.



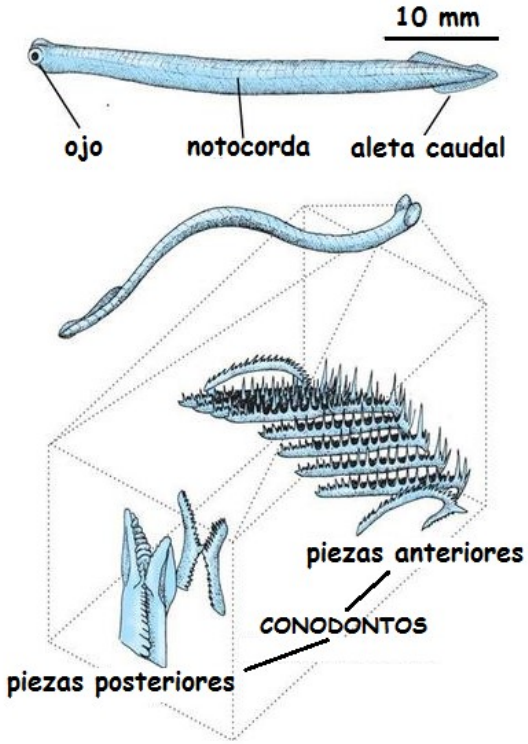
Representación artística de Haikouitchtys, izquierda, (Wikimedia, CC BY-SA 3.0) y de Pikaia gracilens, derecha, (Wikimedia, GFDL 1.2)

Una noticia aparecida en junio de 2014 [5] nos permite expandir el campo geográfico de este tipo de animales antecesores de los vertebrados. Debían ser muy ubicuos en los mares del Cámbrico. En el otro extremo del mundo, en el yacimiento de Burgess Shale de Canadá, se encontró lo que bien pudiera ser un nuevo "nieto" del cordado *Haikouella*. Se trata de fósiles de *Metaspriggina*, datados en hace 505 millones de años, del que se ha comprobado la proximidad filogenética con *Haikouitchtys.* Se ha podido determinar su especial disposición de los arcos braquiales, dobles, que permite hacer un seguimiento en el tiempo de la evolución de las mandíbulas. En un capítulo posterior, el número 29, analizaremos la relación entre ambas estructuras corporales.

También del yacimiento de Burgess Shale es el fósil de *Pikaia,* datado también en hace unos 505 millones de años. Inicialmente se le consideró como uno de los ancestros más antiguos de los vertebrados. Esta afirmación presenta muchas dudas para los círculos científicos y parece que filogenéticamente se debe encontrar más próximo a la línea de los cefalocordados (ver figura anterior). Disponía de un rudimentario cordón "columna vertebral", formado por cartílago junto a su médula espinal, que no habían desarrollado un engrosamiento de la corda en el cráneo a manera de encéfalo. De ahí el nombre del subfilo. En promedio medía 5 centímetros de longitud y debía nadar con facilidad sobre el fondo

marino mediante movimientos ondulatorios, usando su cuerpo y una prolongación de su cola como timón.

Siempre se ha dudado sobre cuál pudo ser el siguiente paso hacia los modernos vertebrados ¿el rudimentario esqueleto óseo ancestral provendría de una variación de las estructuras dentarias o bien de protecciones externas resultantes de un endurecimiento de la piel?



Representación del Conodonto y sus placas
(agnatosactuales.wikispaces.com, CC BY-SA 3.0)

La primera vía la representa el *Conodonto*, un cordado parecido a una anguila. No tenía mandíbulas y se piensa que se alimentaba a través de una boca succionadora muy parecida a la de las actuales lampreas. En esta boca se encontraban unas estructuras óseas semejantes a dientes. Una especie de lengua los sacaba e introducía de la boca, movimiento mediante el que posiblemente raspaba y cribaba las rocas cubiertas de algas.

Incluso les servirían para atrapar a otro tipo de presas, por lo que con el tiempo estos animales se convirtieron en feroces depredadores. Estos dientes eran de fosfato de calcio y es lo que

permite pensar que pudieran ser los más primitivos indicios del hueso. Aparecen hace 500 millones de años y se siguen encontrando hasta el Triásico, hace unos 200 millones de años

La segunda vía de radiación de los vertebrados es la representada por los animales con coraza protectora externa y aparece con los *Ostracodermos*. Ellos fueron los primeros peces y aún no habían desarrollado las mandíbulas. Sus fósiles están datados en hace 475 millones de años durante el Ordovícico. En el capítulo correspondiente hablaremos más de ellos al continuar la saga de los vertebrados.

Una vez presentados los actores nos seguimos preguntando ¿La línea filogenética de los vertebrados se dispone a través de la serie *Pikaia/Conodonto/Ostracodermo* o bien tras *Pikaia* se abren en paralelo por un lado la línea de *Conodonto* y por otro la de *Ostracodermo*/resto de vertebrados?

Las últimas investigaciones parecen demostrar que el último planteamiento [6] es el correcto, de forma que en la historia evolutiva se habría dado por duplicado el episodio de generación de estructuras óseas, una en los conocodontos y otra en los primeros peces acorazados que es la que habría llegado hasta nuestros días.

Adquiriendo habilidades

Este esplendor de vida del Cámbrico se materializó en cincuenta nuevos grupos animales que en apariencia no tenían antecesores conocidos. La mayoría, con simetría bilateral que continúa hasta hoy en día, demostrando que es una habilidad ganadora.

Partíamos de una fauna del Precámbrico tardío que no había desaparecido completamente como lo había hecho la ediacara, ya que su acervo genético les dio alguna ventaja que les favoreció, seres microscópicos que habrían dado el salto ayudados por nuevas habilidades que se habían conseguido, ya desde el Precámbrico, a través de pequeños pasos. Está claro que con cada cambio se abría

para el organismo que lo había desarrollado un horizonte de nuevas posibilidades, llevándolos a formas distintas y más complejas, que no necesariamente más perfectas. Simplemente una alternativa más que podía sobrevivir… o no.

Ya se ha comentado que uno de los detonantes que favorecieron la rápida diversificación bien pudo ser el cambio de estrategia a la hora de buscar alimento, actividad que se independizó del azar (comer cuando la comida se cruzaba en tu camino), para ir activamente en su busca en vez de permanecer a la espera, lo que pudo estimular una carrera armamentística entre predadores y predados. En esta carrera las nuevas habilidades eran permitidas por la selección natural. Un elemental sentido de la visión suponía una ventaja a la hora de buscar comida o cobijo, lo que diferenciaba positivamente a quien lo tuviera del vecino que no lo hubiera desarrollado. Una cuerda cartilaginosa permitía el soporte del cuerpo y reforzaba la capacidad de movimiento. Y más útiles complejidades: ¿Por qué la simetría bilateral? ¿Cómo aparece el cráneo? ¿Y el éxito de los ojos? ¿El porqué de las mandíbulas? ¿Cómo se desarrollaron las "patas"? ¿Por qué llegó la especializada segmentación corporal? ¿Cómo apareció el sistema nervioso que controlaba toda esta complejidad?

Los siguientes capítulos serán un escaparate en donde analizaremos cómo fueron los detalles que contestan a estas preguntas. La clave la tiene la mutación en el genoma particular de cada animal, cualquiera que fuese la vía que se siga, y la posterior selección natural. Aunque tendremos que esperar un poco, ya que antes nos toca hablar de esta última, la selección natural.

NOTAS DEL CAPÍTULO 19:

1. "*Waptia and the Diversification of Brood Care in Early Arthropods*", Jean-Bernard Caron y Jean Vannier (diciembre 2015). Lo podéis encontrar en la publicación Courrente Biology, de enero de 2016.
2. "*Ancient sea creatures filtered food like modern whales*" (marzo 2014). En la web de la Universidad de Bristol encontraréis información de detalle.
3. Los podéis encontrar en esta publicación de Oxford Biology "*The timetree of Life*", Davide Pisani (251-254, Oxford University Press, 2009).
4. "*Development of the annelid axochord: Insights into notochord evolution*", Antonella Lauri et al. (septiembre 2014), que podéis encontrar en la revista Science de septiembre de 2014).
5. "*A primitive fish from the Cambrian of North America*", Simon Conway Morris y Jean-Bernard Caron (junio 2014). Publicado en Nature en junio 2014.
6. La publicación que habla de esta circunstancia, "*Sinking teeth into the evolutionary origin of our skeleton*" (octubre 2013), la encontraréis en la web de la Universidad de Bristol.

20. La evolución por selección natural

En el capítulo anterior hablábamos de los caminos iniciales que habían seguido los animales de los principales filos aparecidos durante el Cámbrico. Todos siguieron sus propios vericuetos de acuerdo al campo de juego permitido por la selección natural. Ahora nos toca hablar de esta última.

Aunque es evidente, hago una advertencia parecida a la que comenté en el capítulo anterior. Con el monográfico de éste rompo de nuevo el devenir cronológico de la biografía de la Vida, que recuperaré una vez acabemos con una especie de "miniserie" interna, que ocupará varios capítulos, sobre diversos aspectos de la evolución que creo merecen una atención especial.

La selección natural ha estado presente en todos los momentos, tanto en el mundo prebiótico como desde cuando la Vida apareció sobre la Tierra. El medio pastorea al individuo, que necesariamente se amolda a ello. El que mejor preparado esté será el que pase adelante. Pero aunque es algo que ocurrió siempre, es en el Cámbrico donde parece que el juego comenzó a ser por primera vez más intenso y sus evidencias más abrumadoras. Tuvieron que pasar unos tres mil millones de años desde las bacterias fotosintetizadoras hasta la fauna ediacara. Por el contrario bastaron sólo 70 millones de años más para que la biosfera volviera a ser irreconocible. Todo fue la consecuencia de un tira y afloja motorizado por la selección natural que respondía al empuje de la presión ambiental, no sólo geológico o climático, sino también el ejercido por la propia biosfera circundante.

La selección natural es tan decisiva en esta biografía de la Vida, y tan exuberante en el Cámbrico, que se impone un nuevo paréntesis teórico para realizar un retrato de este personaje tan fundamental.

Empezaremos por la definición de *evolución*.

En el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española se dan hasta nueve acepciones para la palabra evolución. Entre ellas, la que corresponde al fondo de este capítulo:

"*Proceso continuo de transformación de las especies a través de cambios producidos en sucesivas generaciones*".

Queda claro. No aparece ningún atisbo que permita pensar que en el concepto de evolución se encuentra implícito el de mejora, aunque para la mentalidad competitiva humana parece que la evolución sólo tiene sentido si es para mejorar. Sin embargo, *evolucionar no es equivalente a mejorar*, sino simplemente a desarrollar, transformarse, cambiar.

¿Qué es la evolución biológica?

Es el pausado caminar de la Vida por el que, partiendo de ingredientes muy elementales, tras un proceso generalmente lento y progresivo, se van derivando formas más complejas.

En cada particular momento de la historia de la Vida encontraremos latiendo a una activa biosfera cuajada de organismos interactuando con el medio, que es toda la bullente variedad que les rodea incluidos ellos mismos, con el fin de alimentarse y pasar su herencia al futuro. En este proceso no hay ningún acto volitivo y todo funciona de forma precisa y automática.

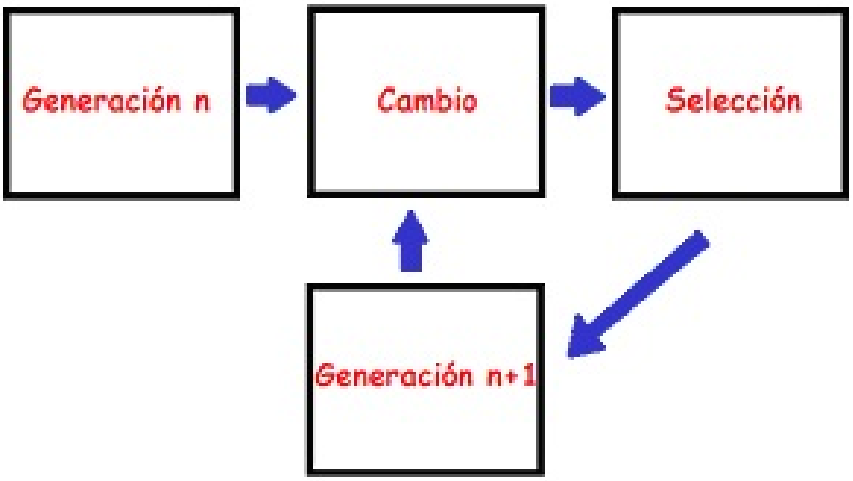
En cada momento observamos que se producen cambios y mutaciones en el acervo biológico de las especies. Estos cambios y mutaciones son provocados por muy diversas causas. En los corrillos de la Ciencia hay algunas aceptadas con gran consenso generalizado y otras consideradas meras especulaciones.

El acervo genético se transmite de generación en generación. Si hay mutaciones y cambios, estos serán también heredados por los descendientes de los padres que hayan sufrido la transformación. La consecuencia de todo ello es que la segunda generación será

distinta de la anterior y deberá enfrentarse de forma distinta a su medio ambiente, que seguramente también habrá variado entre una generación y otra. Normalmente el cambio será tan nimio que resultará difícil diferenciar al hijo del padre.

El medio ambiente, como en el juego del Tetris, propone un espacio a cualquier elemento que entra en la escena, pero sólo le hace ganador si encaja. Así, los nuevos cambios y mutaciones son testados por él, dándoles continuidad si los considera favorables o neutros, o poniéndoles un magnífico stop en el caso que sean desfavorables.

Y así aparece una nueva generación en el siguiente momento temporal sobre la Tierra.



Esquema general de la evolución de las especies

Estas ideas se comenzaron a fundamentar ya en el siglo XIX, ya que en 1809 el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck propuso por primera vez, en su libro "*Filosofía zoológica",* que los organismos vivos no habían sido creados, sino que eran consecuencia de un proceso evolutivo a partir de formas más simples. A esta teoría se la conoce como **Lamarckismo**. El mecanismo que hacía funcionar su teoría lo llamo "herencia de los caracteres adquiridos", por el que establecía que las habilidades adquiridas por los padres en su esfuerzo por la supervivencia se transmitían a los hijos. Es famosa la propuesta de que el esfuerzo

que las jirafas hacen por comer las hojas cada vez a mayor altura, en competencia con sus congéneres, les hacía crecer el cuello. Una mayor longitud que era heredada por su descendencia

Cincuenta años después sería superado por lo que hasta hoy sigue siendo el paradigma: la ***Teoría de la Selección Natural de Darwin***. A comienzos del siglo XX cuando ya se conocían las reglas básicas de la genética (genes, ADN, transmisión sexuada de los genes, la herencia implícita en ellos…), se afianzaron las ideas de Darwin. Con posterioridad, y con el desarrollo del conocimiento de la genética, de la biología molecular y la aparición de nuevas tecnologías que permitieron unos estudios más profundos y detallados, surgieron nuevas voces, discordantes o alternativas, pero siempre enriquecedoras.



Los pioneros del evolucionismo, Mendel, Lamarck y Darwin (Wikimedia, dominio público)

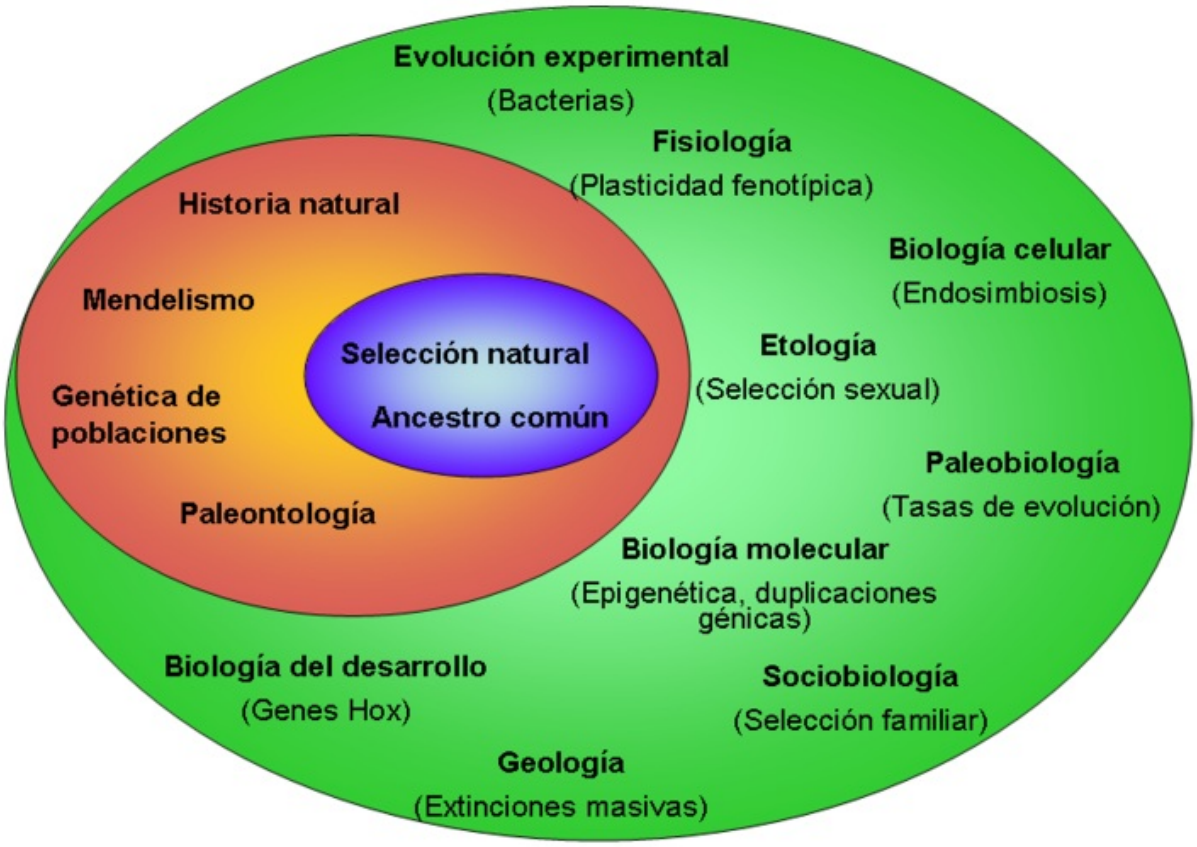
Charles Darwin dio una explicación de como funcionaba la evolución. Apostó por que los organismos vivos sufrían una serie de cambios fenotípicos que serían seleccionados o excluidos por el medio ambiente según el grado de adaptación al mismo. Quien pasara adelante podría engendrar descendencia, la cual heredaría sus innovaciones genéticas colocándose en una situación exitosa como la de sus padres. El proceso sería azaroso, sin propósito determinado, y se produciría a un ritmo lento pero continuo.

A partir del desarrollo de la genética a principios del siglo XX se redescubrieron las leyes de Mendel, que ya eran conocidas, aunque

habían quedado aparcadas en un armario durante la época de Darwin. Con ello se tuvo una explicación científica del porqué de las modificaciones que Mendel postuló en su teoría. La genética hizo más sólido el argumento al descubrirse los genes y sus mutaciones. La unión de todas estas ideas científicas dio lugar a lo que se llama la ***teoría sintética de la evolución***. Con ella se ha pasado de la idea de que en un mundo con escasez de recursos el ser más adaptado es el que sobrevive, a la idea de que el que progresa es aquel que está mejor preparado para reproducirse, lo hace con más intensidad y además sus herederos poseen la misma habilidad.

Sin embargo, la propia teoría dejaba en el aire la posibilidad de diversas interpretaciones acerca de tres aspectos fundamentales, como eran cuál podía ser **el motor**, cuál **el ritmo** y cuál **la dirección de la evolución**. O incluso cuál pudiera ser **el ente básico** que evoluciona: genes, individuos, grupos, especies… El proceso podía ser lento o rápido, el proceso podía ser azaroso o con un propósito, el motor de la evolución podía ser el medio ambiente o se encontraba implícito en el propio organismo que evolucionaba, los genes mutaban puntualmente o había transferencias genéticas en grandes bloques, el cambio era unidireccional o podía dar marcha atrás… en fin, un campo propicio para la discusión científica.

Y aquí entró de lleno la especial idiosincrasia de los humanos y su ego. Aún dentro de un contexto en donde nadie discute la veracidad del proceso evolutivo, cada maestro, cada científico, manuscribe sus particulares opiniones, a veces con gran vehemencia. Y así, a lo largo de la historia podemos encontrar en los libros de la teoría de la evolución "dictámenes" para todos los gustos de grandes investigadores, biólogos, genetistas y paleontólogos, en los que se entremezclan diferentes visiones de las incógnitas que dejó abiertas la teoría básica de Darwin, fabricando entre todos ellos un exhaustivo abanico de combinaciones.



Representación gráfica de la continua expansión de la teoría evolutiva en términos de las ideas, fenómenos estudiados y campos del conocimiento. La elipse más pequeña representa el Darwinismo original, la elipse de tamaño intermedio a la Teoría Sintética y la más grande, a la síntesis ampliada. Esta última integra a por lo menos diez disciplinas científicas adicionales (Wikimedia, dominio público)

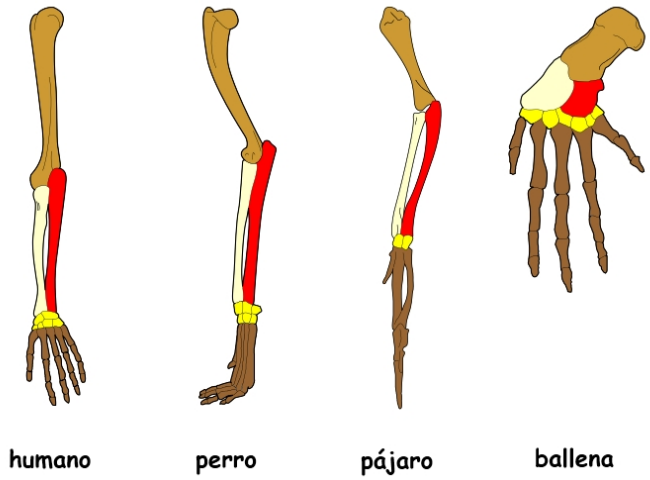
Soy de la opinión de que prácticamente todas las aportaciones son complementarias y que todas ellas pueden dar una explicación parcial de un proceso general que se esquematizó en la figura anterior. Todas mejoran el conocimiento de lo que parece que pudo ser. Algo así puede deducirse de la figura siguiente, que representa la expansión de las ideas evolucionistas.

La realidad de la evolución

Hemos comentado que nadie en el mundo de la ciencia cuestiona ***la realidad de la evolución***, ya que hay fuertes evidencias de ello soportadas en múltiples hechos comprobados.

Podríamos empezar por una certeza: la de que no hay ningún dato, hallazgo o evidencia que muestre que todas las especies aparecieron a la vez.

Y luego seguir por la clara pista que dejan los fósiles. De su observación se concluye una línea de progresión evolutiva que no se contradice con la línea de progresión geológica-temporal de los estratos donde fosilizaron. En estratos más antiguos encontramos siempre organismos representantes de etapas evolutivas menos desarrolladas.



(Wikimedia, dominio público)

Así, hasta concluir con el hecho de que el análisis taxonómico de grupos de fósiles evidencia en sus estructuras y tejidos una progresión en el tiempo constante y gradual, apareciendo en diversas especies soluciones, características y funciones comunes que permiten pensar que lo más plausible es que se originaran en un ancestro común. Por ejemplo, los mismos huesos con distintas formas y tamaños en individuos de especies distintas. Como se ha intentado mostrar en la imagen anterior donde se presenta la homología de varios huesos (mostrados en distintos colores) de las extremidades delanteras de cuatro vertebrados que permite imaginar un ancestro común para todos ellos.

Con el avance en el conocimiento de la genética y la biología molecular se ha podido hacer un rastreo de genes y proteínas y sus

mutaciones, así como de las secuencias de nucleótidos en los ADN y los porcentajes que comparten las especies, llegando siempre a la conclusión de una evolución constante a partir de unos antecesores comunes y más simples. Todos los seres vivos compartimos demasiado genoma, multitud de soluciones metabólicas y reiteración de los mismos diseños corporales, con una más que plausible explicación en la evolución.

Esta evolución se ha producido por lo general de forma continua y lenta, por acumulación de pequeños cambios entre padres e hijos. Lo cual tampoco hay que considerarlo como una regla general, ya que en la crónica también se sabe de episodios en donde la velocidad del cambio se aceleró, surgiendo nuevas especies de forma muy rápida a nivel de percepción temporal geológica. El estudio de los datos reales nos ha permitido saber que *el camino de la evolución ha sido progresivo, a veces al paso y a veces al galope, pero que no se ha parado en el tiempo*. Al analizar los motivos de los cambios en el acervo genético de la biomasa veremos que ambas modalidades encajan perfectamente, ya que algunos cambios son claramente lentos y progresivos y otros aparecen tras lo que parece un salto.

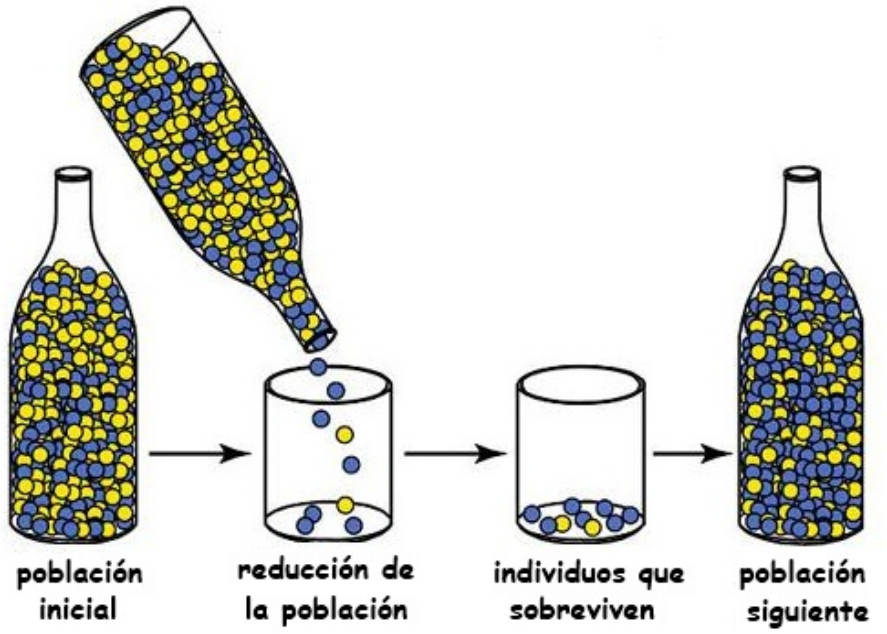
El motor de la evolución

Antes hablaremos del ***motor de la evolución***, aquello que impulsa el camino de los cambios. Después de todo lo comentado, no hay que insistir en que la gran mayoría del mundo de la biología acepta como la gran impulsora de la evolución, y casi única, a la **selección natural**. Es la principal causa del origen de las especies y de su adaptación al medio, que actúa respetando aquellos cambios que permiten a los individuos que los ostentan el sobrevivir durante un periodo lo suficiente extenso como para reproducirse y así transmitir su herencia. He dicho un par de párrafos antes que la selección natural es el motor "casi único" de la evolución, ya que hay algunas tendencias de pensamiento que le adosan un complemento, un nuevo factor de selección distinto al medioambiental: la **deriva genética**.

Su propio nombre, deriva, da una pista de su alcance. La selección natural hace navegar con un firme rumbo. Todo consiste en estar en el momento indicado y en el punto preciso con las mejores condiciones. El resultado es que podrás pasar tu herencia con mayor fortaleza. Mientras que el proceso de deriva genética tiene que ver con el azar que la propia palabra deriva deja adivinar. Tiene que ver simplemente con las especificidades del mecanismo de transmisión de genes y la variabilidad aleatoria que se produce en el proceso, cosa que ya conocemos del capítulo 14k de esta serie. Dos progenitores pasan sus genes a la descendencia. Para cada gen del hijo el padre aporta uno de sus dos alelos -variaciones de un mismo gen- y la madre también uno de los dos suyos. Con lo que el descendiente dispone de un par de alelos adjudicados a través de un proceso absolutamente aleatorio. Pueden ser alelos con "valor" evolutivo o "indiferentes". No hay preferencias.

En esto consiste la deriva genética, en una variación del acervo genético de una población fuera de las normas de las mayorías, como una simple consecuencia del mecanismo de emparejamiento de genes. Pudiendo llegar el caso de que no es la selección natural sino la deriva genética la causa inicial de un nuevo fenotipo e incluso de una nueva especie. Y *aún antes* de haber hecho acto de presencia la selección natural, como creo que ayuda a entender el ejemplo siguiente.

La siguiente ilustración es una explicación muy gráfica del porqué de la deriva genética: *el cuello de botella*, circunstancia que puede ser asimilada al hecho de un aislamiento geográfico o genético experimentado por un determinado grupo poblacional. A partir de una población de fenotipo equilibrado en colores, se aísla un pequeño grupo que por azar es eminentemente azul (el motivo por el que ocurre no es importante ahora mismo, luego profundizaremos en él). Es fácil imaginar que con el tiempo la población resultante habrá cambiado su fenotipo medio y será mayoritariamente azul. Se puede haber creado incluso una nueva especie.



Analogía de la deriva genética (Wikimedia, dominio público)

Este proceso explica también el hecho de que a pesar de que la selección natural tiende a eliminar los componentes perjudiciales del genoma, sigan apareciendo genes, incluso recesivos (que no se manifiestan si su alelo pareja es dominante) causantes de enfermedades graves o letales. Siempre hay una probabilidad, aunque sea mínima, de que el azar elija este gen alterado durante el proceso de transmisión de la herencia genética desde los padres a los hijos. Aunque sea perjudicial para el individuo.

Este es el contexto en el que los biólogos discuten profundamente hasta dónde el *azar* de la deriva genética puede "jugar" con el *dictamen* de la selección natural. A simple vista parece claro que la deriva genética no debería tener problemas para seguir con su aleatoriedad, incluso en aquellos casos que puedan ser dañinos. Sin embargo también parece razonable pensar que a largo plazo la selección natural quedará como juez supremo de la evolución.

El biólogo matemático japonés Motō Kimura ya planteó a finales de los 60's una variante de la visión anterior. Postuló que la gran mayoría de las mutaciones producen genes selectivamente neutros, es decir, no tienen frente a la selección natural ni más ni menos

ventajas que los genes que sustituyen, por lo que la gran mayoría de los cambios evolutivos a nivel molecular son causados por la deriva genética, dejando un escaso protagonismo a la selección natural, que sin embargo él no negaba.

Un sencillo razonamiento matemático le permitió postular a Kimura que una variación genética beneficiosa, o un gen beneficioso ya establecido, se fijará en la población proporcionalmente al tamaño de la misma, al beneficio de la mutación y al éxito de la deriva genética entre generaciones con respecto a esta mutación. La conclusión no queda fuera de lo lógico. A su teoría se la conoce como la **teoría neutralista de la evolución molecular.**

Las causas que motivan los cambios

Hemos vistos los motores, y ahora pasaremos a comentar ***cuáles son las causas que motivan los cambios***. Los procesos pueden ser variados según lo que se conoce de la observación de la realidad o según lo que la teoría soporta sólidamente:

- Cambios por azar de los genes a través de *mutaciones producidas por acción de agentes externos*. Dichos cambios alteran la secuencia de nucleótidos del ADN. Las consecuencias suelen ser la eliminación o cambio de pares de bases, o un desplazamiento de un tramo de la cadena o una alteración de las claves de corte y empalme de los exones. Incluso con bastante frecuencia se produce una duplicación de un tramo del ADN o una división o unión de cromosomas completos. En definitiva, una nueva relación entre genes y una generación de nuevas proteínas.

Hay que precisar que contrariamente a lo que apoyan las teorías, podríamos decir, gen-atómicas, que postulan que cada gen es independiente, la realidad que se va constatando con mayor evidencia a medida que la genómica prospera, es que los genomas son objetos más organizados, con elementos que cumplen diferentes roles funcionales y entre los que se establecen múltiples interacciones. Por lo que resulta muy arriesgado el aceptar la tesis

simplista de que los genes individuales son las unidades de selección o, mejor dicho, las únicas unidades de selección.

Sólo los cambios beneficiosos son los que mueven la evolución, ya que los perjudiciales serán a la larga eliminados por la selección natural. No obstante, se piensa, un poco en la línea de Kimura, que la mayoría de los cambios son neutros y que aunque pueden llegar a cambiar el fenotipo químico de las células con nuevas proteínas y relaciones entre genes, sus consecuencias serán neutras para la supervivencia, al no ser "vistos" por el medio ambiente que así no los somete a selección.

Las mutaciones en los genes son la probable causa de uno de los principales mecanismos de diversificación fenotípica y, por tanto, de diversificación evolutiva. Hablamos de la heterocronía, que consiste en el cambio de ritmo, o del momento en que se producen, de los procesos de desarrollo físico de los organismos. Lo cual diferenciará a la larga una especie de otra, inicialmente coincidentes. La principal pauta dentro de la heterocronía es el pedomorfismo, que puede resultar en una ralentización del proceso, por lo que podríamos decir que a final de vida el fenotipo es aún juvenil, o en una aceleración que adelanta la madurez sexual, la cual se produce en un cuerpo juvenil que continúa fenotípicamente así.

- Cambios en el acervo genético por *aislamiento de poblaciones*. Está probado que si separamos a una población en dos y las aislamos genéticamente (por aislamiento geográfico, por ejemplo) ambas poblaciones evolucionarán con el tiempo de forma divergente, aunque cada "isla poblacional" esté sometida a las mismas condiciones medioambientales. En estas "islas" cualquier mutación aprovechable sería respetada por el medio ambiente y con el tiempo, si es más eficiente que la alternativa más antigua, se extendería a toda la población en un plazo relativamente corto. La deriva genética interviene en gran medida en esta forma de cambio circunstancial de los genes.

La deriva genética es más espectacular en poblaciones pequeñas, muy por debajo del número de estasis -número máximo de sujetos que cohabitan en un medio ambiente sin sufrir una presión suficiente que derive en cambios genéticos (hay suficiente alimento, no hay depredadores…)- ya que cualquier cambio favorable es más fácilmente trasladable al resto de la población, y aí en poco tiempo hacerse dominante.

Esta es la hipótesis en donde se apoya una teoría muy afianzada, la del **equilibrio puntuado**, propuesta por los biólogos Stephen Jay Gould y Niles Eldredge. Postula que la evolución no es un camino lento y progresivo, sino que la aparición de nuevas especies se da de forma casi puntual, por aislamiento genético y deriva genética, tras lo que permanece estable en el tiempo durante muchos años hasta que se da otro episodio de especiación rápida.[1] En principio esta teoría parece en franca oposición a la síntesis de la evolución darwiniana, pero en el fondo sólo varía en las formas. El motor del cambio es el mismo, y sólo varía el ritmo.

- *Errores en los procesos de transmisión de genes* por vía sexual, es decir, errores durante la fabricación de los cromosomas de los hijos, ya sea mientras son duplicados o mientras se lleva a cabo el proceso de recombinación durante la meiosis.

- *Transferencia horizontal de genes*. Es un proceso en el que un organismo transfiere material genético a otra célula que no es su descendiente.

Ejemplos hay, y muchos. Ya hablamos de la cesión de parte del genoma mitocondrial al ADN de las eucariotas. Incluso puede ser que un virus se incruste en la cadena del ADN de un hospedante. Dentro del mundo bacteriano está comprobado que este proceso es el principal mecanismo de expansión de los genes que les hacen resistentes a los antibióticos. Cuando una célula bacteriana evoluciona y consigue esta resistencia, puede transferir rápidamente estos genes a otras especies bacterianas.

- Por *simbiosis*. El proceso es similar al anterior, aunque el resultado pueda ser una modificación más importante. Dos seres se asocian para ayudarse, complementarse y encontrar un acomodo mejor en su medio ambiente.

Ya sabemos que una de las más conocidas en el camino de la evolución es la aparición de la célula eucariota, con sus mitocondrias y plastos, como ya se explicó en el capítulo 11 anterior. En la naturaleza podemos observar múltiples ejemplos vivos de bacterias dentro de bacterias, y de éstas dentro de células de organismos más complejos, simbiosis en simbiosis.

Hablaremos aquí también de la controvertida teoría de la **evolución hologenómica** como un caso especial de simbiosis. No es una idea reconocida por la totalidad de la familia científica de la biología, aunque hay argumentos y pruebas que permiten aceptarla como una posibilidad. Se basa en el hecho de que todo animal o planta no es un organismo individual, sino un macroorganismo formado por ellos mismos y todo el conjunto de microbiota[2] que recubre su superficie o trabaja en su interior. Por ejemplo, una vaca es una vaca más los millones de bacterias que trabajan en su aparato digestivo. Los unos sin los otros no tienen viabilidad. Al conjunto se le llama un **holobionte** y al conjunto de sus genomas el **hologenoma**. La teoría propuesta,[3] entre otros, por los biólogos I. Z. Rosenberg y E. Rosenberg, afirma que el hologenoma se mueve casi como un todo, de forma que han podido comprobar que la asociación entre el hospedador y los simbiontes afecta a la relación del holobionte con el medio ambiente. Bajo determinadas condiciones de presión externa el genoma de la microbiota evoluciona rápidamente y arrastra a la evolución del genoma del organismo hospedante, que dispone así de una ventaja para adaptarse al nuevo entorno de estrés. Todo esto sugiere que el conjunto de los genomas de los organismos que establecen la simbiosis pueden jugar un importante papel en la adaptación y en la evolución de los organismos superiores. El holobionte se comportaría por tanto como una unidad evolutiva.

- Por *selección sexual*. Los machos y las hembras parecen actuar de una forma caprichosa al buscar pareja y aparearse. Sin embargo, la realidad es que eligen atraídos por alguna característica específica del oponente. El gen que expresa la característica atractiva es el que se propaga y al final se impone en la población. Un ejemplo clásico es el de las aves del paraíso, con sus kilométricas y coloridas plumas de las colas que realmente son un estorbo para volar y escabullirse de los predadores… ¡pero atraen a sus hembras!

El ente que es el paciente de la selección y evoluciona

A pesar de la longitud que va adquiriendo este capítulo, no puedo cerrarla sin hablar de cuál pueda ser la unidad evolutiva. Y en este campo, como en todo en la ciencia, hay tesis para todos los gustos. Aunque los avances en el conocimiento de los genomas y de su funcionamiento, así como de los factores que deciden los comportamientos individuales o de grupo, parecen decantar la idea de que no hay una sola unidad, sino que la evolución actúa sobre todo ente en el que vemos que se puede producirse una variación su morfología y costumbres, que además legue sus rasgos biológicos a la descendencia y en el que se pueda producir una variación en la eficiencia del éxito reproductivo -o replicativo-. Y aquí entran cosas tan variadas y diferentes como los genes, los sistemas de genes, las células, los individuos, los grupos o las especies. Es más, en un determinado momento pudiera producirse un "mix" evolutivo de todas o parte de estas unidades, lo que en algún caso se conoce como selección "multinivel", por la que los comportamientos egoístas son vector y resultado de la selección individual y los altruistas lo son de la selección de grupo. No obstante cada una de las posibilidades tiene sus partidarios y sus detractores, y la literatura al respecto es extensa.

Hasta aquí hemos navegado comprobando la veracidad del hecho evolutivo, los motores que lo dinamizan, su ritmo, las causas de los cambios sobre los que apoya su quehacer y los posibles sujetos que la viven. En el próximo capítulo continuaremos el hilo

principal centrando nuestra atención en la posibilidad real del cambio.

NOTAS DEL CAPÍTULO 20:

1. En biología se denomina **especiación** kal proceso mediante el cual una población de una determinada especie da lugar a otra u otras especies.
2. La **microbiota** es el conjunto de microorganismos que se localizan de manera normal en distintos sitios de los cuerpos de los seres vivos pluricelulares tales como el cuerpo humano.
3. "*Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution*", Ilana Zilber-Rosenberg y Eugene Rosenberg (2008). Podéis leer los detalles de esta teoría en la revista FEMS Microbiology Reviews de junio de 2008.

21. La posibilidad real del cambio

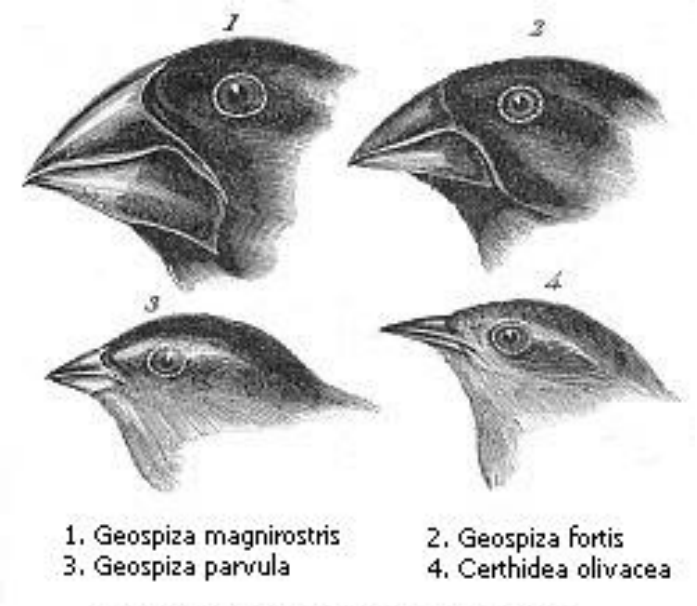
En el capítulo anterior analizamos el hecho evolutivo, los motores que lo dinamizan, su ritmo y las causas de los cambios sobre los que apoya su quehacer. Continuemos ahora el hilo principal centrando nuestra atención en la posibilidad real del cambio.

Partamos del inicio centrándonos en una segunda generación evolutiva, quizás con un ligero e inapreciable cambio externo, el hijo no muy distinto del padre, o bien con un cambio larvado en su interior que se expresará en un breve plazo de tiempo impulsando un rápido salto. En un caso o en otro, la generación hija se encontrará inmersa en un medio ambiente muy concreto, que le va a fijar las condiciones de alimentación, que lleva aparejado un entorno climático que condiciona sus habitats y que le monta un entorno de biota con la que tiene que competir. En este apartamento comunitario tiene que sumergir su propio organismo y pelear con sus nuevas capacidades individuales, ciertamente diferentes a las de sus padres. Éste es el sujeto de la acción.

En este momento hace su entrada la "*Juez Selección Natural*". Juez sin capacidad de decisión, irremediablemente previsible. Algo así como "¿Llueve? Luego me mojo". Tan simple como: "la mutación no encaja en el medio ambiente, *ergo* no continúa; la mutación encaja en el medio ambiente, *ergo* continúa". Si por casualidad la mutación ofrece una ventaja diferencial sobre los vecinos va a encontrar un hueco, y por tanto sobrevivirá, se expandirá y se impondrá. Éste es el dictamen.

Y éste es el resultado real y comprobable. Tenemos múltiples ejemplos ante nuestros ojos. El tan conocido de los pinzones de las islas Galápagos, que hizo rumiar su teoría a Darwin. En cada una de las islas los pinzones son diferentes, siendo así que debieron llegar todos ellos del lejano continente -a 1.000 kilómetros de distancia-. Lo debieron conseguir muy pocos individuos, una

población muy escasa y, por tanto, una primera generación de individuos todos ellos iguales. Las ligeras diferencias medioambientales en cada una de las islas los desviaron por distintos caminos, desarrollando distintos fenotipos, todos sustancialmente diferentes al de sus abuelos, los pinzones del continente sudamericano de donde provenían.



Pinzones de las Galápagos (Wikimedia, dominio público)

Pero no todo es tan sencillo y evidente. Siempre surge la siguiente pregunta: si la evolución es tan paciente y avanza pasito a pasito, estos han tenido que ser tan numerosos que se habrá necesitado un periodo de tiempo casi infinito para conseguir el complejo escenario final que conocemos. Es lógico el planteárselo, pero también es obligado el intentar husmear entre las posibles explicaciones.

La evolución no es un proceso azaroso por el que de repente surge la organización. Ni siquiera cada uno de los pasos evolutivos son azarosos, en el sentido de que cada uno no supone un nuevo barajar de cartas, y si hay suerte sale la adecuada. Todo el proceso es una escalera y cada escalón se apoya en el anterior, no es un nuevo invento. Podrá ser un escalón infinitesimal, un infinitesimal de rampa, como propugnan los neodarwinistas, o podrá de vez en

cuando producirse un escalón más grande, según postula la teoría del equilibrio puntuado. Pero cada escalón supone un paso de loadaptación dentro de unas condiciones medioambientales continuamente cambiantes. Comenzar de nuevo en cada escalón y tener suerte es algo extremadamente improbable. Comenzar un escalón apoyado en las ventajas y adaptación del anterior incrementa en muchos factores la viabilidad de conseguir algo útil, de acuerdo con los patrones de utilidad que la Vida dibuja en cada momento.

Sabemos que la selección natural juega con los "dados cargados". Aunque el elemento iniciador del pequeño paso es contingente, no así los resultados que son modulados por la acción de dicho "truco". No cualquier cambio es posible. El medio ambiente permite que sean viables sólo algunas jugadas entre todas las posibles, al reducir la red de posibles caminos por donde puede dibujarse esta serie, lo que incrementa en gran medida la probabilidad total de producirse la larga cadena evolutiva "primera-última generación". A un nivel muy simple, la probabilidad de un doble seis jugando a la pareja de dados es 1/36, mientras que si se juega con uno de los dados trucado, de forma que siempre salga el seis, la probabilidad pasa a 1/6, es decir, se ha incrementado en un factor de seis. Y es que, además, en la naturaleza hay millones de jugadores independientes en paralelo. Ésta es la gran baza de la selección natural y, a la postre, de la teoría de Darwin.

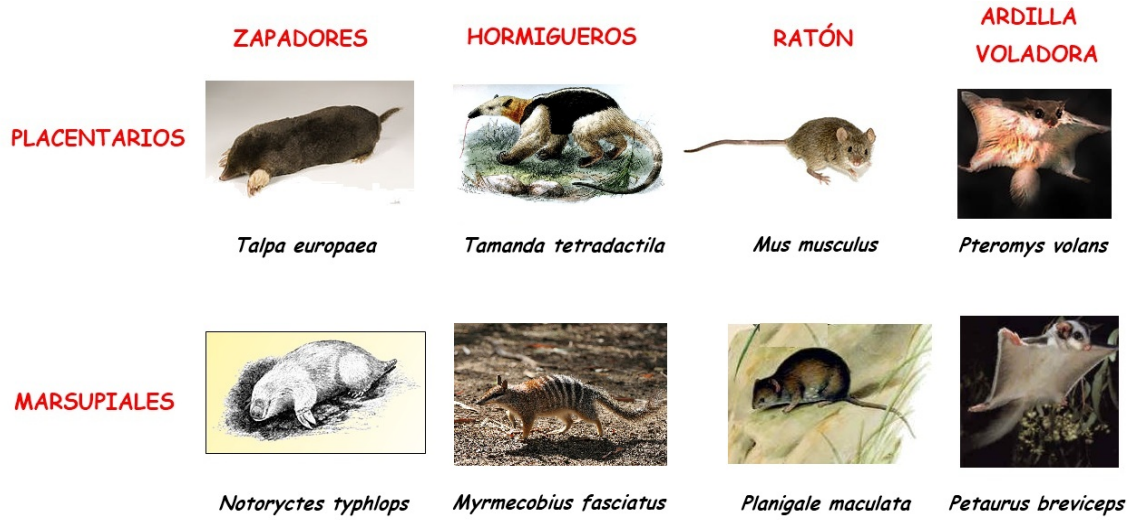
Cada pequeño avance fue una humilde y aprovechable conquista que fue útil en su momento, quizás en algo mínimamente diferencial, pero que llevaba en sí mismo la semilla de nuevos éxitos para el organismo afortunado, y lo sabemos porque su descendencia está hoy entre nosotros. ¡Qué poco parece una mejora de un 0,01%! Pero para un animal es mejor un 0,01% de visión que un 0%, como dicen Stephen J. Gould y Richard Dawkins. Mejor disponer de un 0,01 % de capacidad de vuelo que no gozar en absoluto de esta posibilidad. El animal que descubrió el avance sin lugar a dudas se movería con más comodidad por su ambiente. Que

no pudiera ver formas y colores con su pequeño y rudimentario órgano visual no era el problema, porque veía sombras que le permitían adelantarse a la llegada del depredador. No podría cruzar océanos en un perfecto vuelo migratorio… pero podía sorprender a una presa en un torpe planeo desde lo alto de un árbol. La selección natural no pretende diseños perfectos, sino tan sólo mínimos avances que sean útiles para el organismo que lo consigue.

Creo que hay una realidad que afianza con rotundidad el concepto de sencillez e inevitabilidad del hecho evolutivo, lo que se conoce como **evolución convergente**, y que saldrá más de una vez a lo largo de esta serie. No se trata de un motor de cambio, ni de una causa que condiciona la evolución, sino de un resultado de la propia evolución sometida al juego de las presiones ambientales. Y, permaneciendo el resultado dentro de los esquemas generales, sin embargo se comporta de forma muy particular. En líneas generales la *evolución convergente* se concreta en el hecho por el que especies diferentes, incluso lejanamente emparentadas en el árbol filogenético, y aisladas geográficamente o en el tiempo (lo que impide un intercambio de genomas) cuando son sometidas a condiciones de contorno medio ambientales semejantes evolucionan hacia morfologías y hábitos muy parecidos. ¿Por qué la historia se repite en situaciones inconexas? ¿Es significativo el hecho de que en todas ellas los códigos vitales -bioquímica, metabolismo, genética- y el medioambiente -clima, geografía, hábitat- sea lo único que mantiene una constante?

Es realmente interesante asomarse a algún mundo concreto de la evolución convergente. Es paradigmático el caso de los mamíferos placentarios y marsupiales. Llegado el momento, en esta serie hablaremos de ellos y de cómo divergieron por condicionamientos de un ineludible aislamiento geográfico: los continentes se separaban unos de otros. Y, sin embargo, en territorios diferentes los animales que ocuparon nichos similares, con el paso del tiempo adoptaron formas y costumbres similares. Mejor una imagen que mil palabras. A la vista de la siguiente estoy seguro de que os dais

cuenta de los similares que son sus fenotipos a pesar de pertenecer a distintas ramas evolutivas de los mamíferos.



Algunos ejemplos de mamíferos placentarios y marsupiales ejemplo de morfologías similares por evolución convergente (Imágenes: Wikimedia con licencias CC, GFNU y dominio público

Otro claro ejemplo de evolución convergente es el hecho de que en animales tan dispares y con historias evolutivas emparentadas sólo en su inicio hace 590 millones de años, como los mamíferos y los cefalópodos, se hayan desarrollado ojos con estructuras tan similares. O el descubrimiento de membranas como herramientas de vuelo por reptiles como los dinosaurios o mamíferos como los murciélagos. O también las semejanzas de formas y conductas entre individuos de la familia de los sirénidos -manatís- emparentados con los elefantes, o de los cetáceos -delfines- muy próximos a los hipopótamos, e incluso de los pinnípedos -focas- emparentados con los osos. Siendo todos ellos mamíferos, sorprendentemente unos lo son hervíboros y otros carnívoros.

Aunque las evidencias de que la evolución es un hecho natural más o menos probable e inevitable, siempre quedará como un problema el que la percepción de la probabilidad tiende a la subjetividad. Aún aceptando que no hay impedimentos biológicos para que surja a lo largo de miles de millones de años una larga cadena de ínfimos pero muy útiles cambios en el fenotipo de los seres vivos, la

cuestión que sigue flotando es la de *cuánto de probable hay en el proceso*.

Hay un estudio teórico[1] sobre la evolución del ojo de los biólogos suecos D. E. Nilsson y S. Pelger en 1994 con los que se ponen números a la lógica duda. Simularon la evolución del ojo de los vertebrados -podemos asimilar el modelo al de un pez- con el objeto de estimar el tiempo necesario para su creación. Partían de un primitivo ojo fotorreceptor, formado por tres capas: una capa inferior opaca a la luz, una capa intermedia formada por células fotosensibles, y una tercera capa protectora formada por material transparente. Con este "ojo" simularon una población original de individuos, de forma que en cada generación se producían pequeños cambios al azar que afectaban al grosor de una de las capas o al índice de refracción de una zona parcial de la capa transparente. Impusieron la traba de que no podía haber más que una mutación por ojo en cada paso evolutivo. De acuerdo con la mutación observada calculaban un número que "medía" la calidad de la imagen. Si se veía que una variante nueva producía una mejor imagen, se seleccionaba de forma que las siguientes mutaciones tenían lugar en la población con esta nueva variante. Los resultados de la simulación fueron espectaculares. Si en el modelo se supone que se producen cambios del 1% de las unidades iniciales, en 1.829 pasos se consigue, como por arte de magia, un ojo en forma de cámara con lente de refracción, semejante a la de un pez.

¿Qué significa esto en número de generaciones? Considerando en el cálculo valores pesimistas del coeficiente de selección[2] y de la heredabilidad,[3] además de suponer que cada generación se renueva al cabo de un año, lo cual es muy normal en animales acuáticos pequeños, el número de pasos se corresponde con 364.000 generaciones o años. Esto es un instante de tiempo comparado con la magnitud del tiempo geológico. La primera evidencia fósil de un animal con ojos data de hace aproximadamente 550 millones de años, teóricamente hasta el día de hoy podría haber evolucionado el ojo de Nilsson y Pelger mil quinientas veces.



Serie evolutiva teórica que produce un ojo de vertebrado (a partir de Nilsson y Pelger, 1994, ver nota 1 a final de capítulo, fair use)

El frío dato se presta a interpretaciones múltiples, como no podía ser de otra manera, pero el margen para corregir errores y generar posibilidades hace que estas interpretaciones podamos calificarlas, por lo menos, de muy conservadoras.

Y no hay más… ni menos. La Teoría de la Evolución por selección natural. Aunque cada uno es libre de tener su propia teoría… dentro de la lógica del método científico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 21:

1. "*A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve*", Dan E. Nilsson y Susanne Pelger, (abril 1994). Se publicó en Biological Sciences, volumen 256, número 1345, de abril de 1994.

2. Al efecto de la selección natural sobre la eficacia biológica media de un genotipo se le da el nombre de **coeficiente de selección** y mide la reducción proporcional de la contribución

gamética de ese genotipo en relación a la del fenotipo más favorecido (o menos desfavorecido) cuya eficacia biológica se toma como unidad.

3. La **heredabilidad** es la proporción de la varianza (la varianza da idea de la dispersión de los datos medidos sobre una variable) fenotípica total que es debida a causas genéticas. En otras palabras, la heredabilidad mide la importancia relativa de la varianza genética como determinante de la varianza fenotípica.

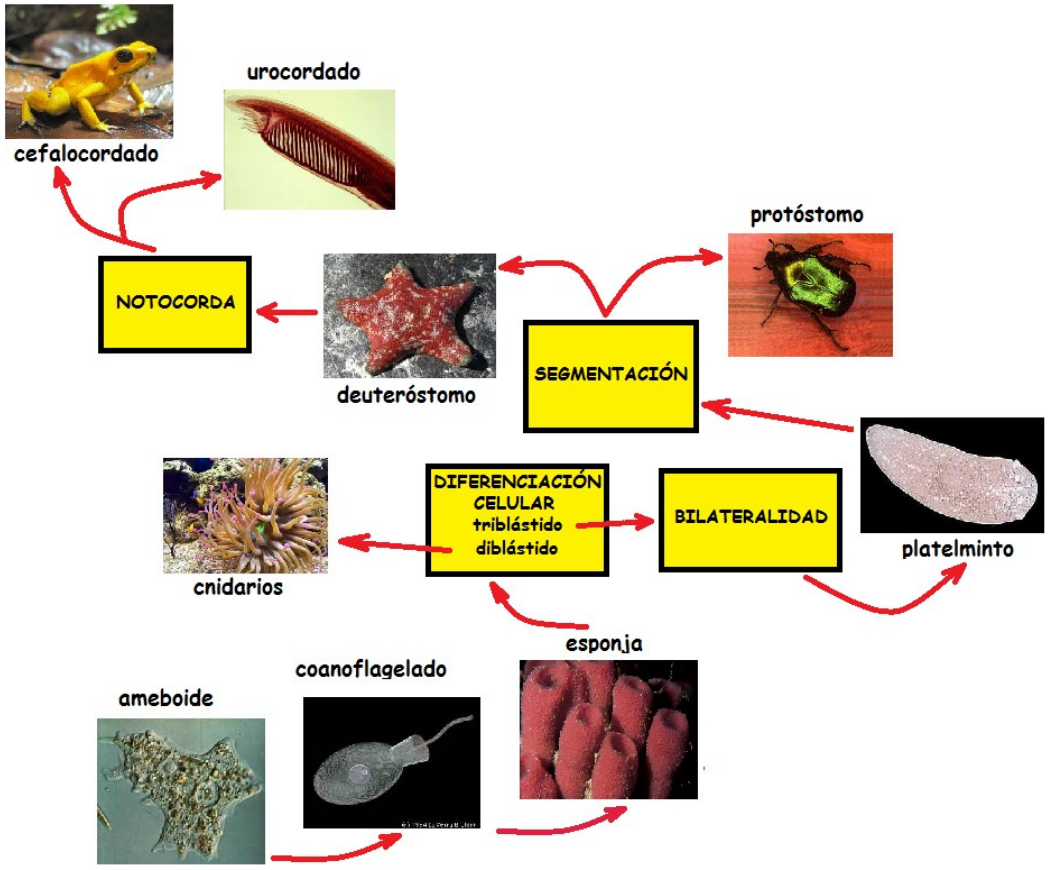
22. El camino de la diferenciación celular

En los anteriores capítulos hablábamos sobre el concepto de Evolución y cuáles eran las circunstancias que le acompañan. A partir de este capítulo vamos a desarrollar el análisis de temas muy particulares, resultados del modelado evolutivo. Se trata de la evolución de la complejidad, de cómo surge la diferenciación celular, la segmentación y los órganos directores, sustentadores o alimentadores de las células y organismos.

En el transcurso de nuestra narración cronológica habíamos llegado a la explosión del Cámbrico, la cual nos incita a hacer una parada y observar el inmenso paisaje desde sus alturas, contemplando los profundos cambios que ha experimentado nuestro planeta desde entonces. Desde los primeros protistas eucariotas hasta la actualidad, en donde las estructuras orgánicas se han complicado de tal forma que los mamíferos son presentados como paradigma de esta realidad, la maquinaria de vida de los seres se ha visto modificada a golpes del timón de la variación genética y la selección natural, golpes a veces suaves y en otras ocasiones enérgicos. De 600 a 700 millones de años nos contemplan.

Aunque es evidente, hago una advertencia parecida a la que comenté en capítulos anteriores. El monográfico de hoy rompe de nuevo el devenir cronológico de la biografía de la Vida, que recuperaremos una vez acabemos con una especie de “miniserie” interna, que ocupará varios capítulos, sobre diversos aspectos de la evolución que creo merecen una atención especial. Dicho esto, sigue la historia.

En concreto hoy, tras un dibujo general del plano evolutivo, hablaremos del camino seguido para la diferenciación celular: cómo de una célula única del cigoto se llega a células variadas en forma y especialización.

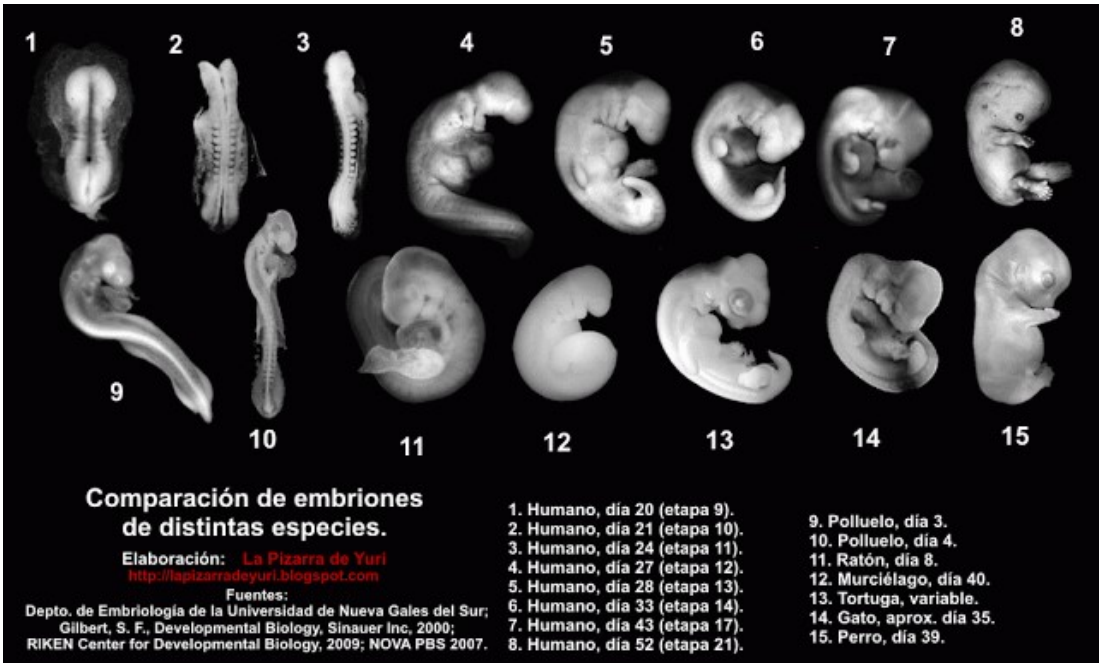


Camino secuencial de la aparición de la complejidad animal (a partir de imágenes de Wikipedia)

La imagen anterior dibuja las estrategias seguidas en el camino hacia la complejidad. Para entenderla mejor deberemos partir del primer momento del desarrollo embrionario, cuando se da a las células el manual para la vida, cuando se les dice cuál debe ser su cometido diferenciándolas unas de otras. El invento de la especificidad de estas instrucciones debió suceder hace unos 750 millones de años. Desde entonces los organismos han accedido a diversos caminos funcionales y morfológicos, perfectamente operativos. El resultado ha sido plural y siempre en forma de seres correctamente constituidos.

Como en algún punto tengo que comenzar, propongo que imaginemos el inicio de la historia de la complejidad en un momento en que un pequeño ameboide adoptó la originalidad de un **flagelo**, transformándose en un "nervioso" coanozoo. Unos

cuantos de estos nuevos y activos colegas se agruparon formando un porífero -una esponja-, uno de los primeros seres con **células organizadas en comunidad**. Para poder avanzar por la historia, este animal necesitaba hacer más complejo su organismo, necesitaba un manual de instrucciones un poco más pesado, y lo consiguió haciendo una serie de retoques en el proceso de desarrollo embrionario que le permitieran pensar en novedosos tejidos y sofisticadas estructuras. Adoptó, hace unos 630 millones de años, la eficaz **simetría bilateral** para transformarse en un gusano plano, un platelminto, y desde entonces esta armónica disposición perdura hasta los vertebrados de hoy en día.



Una imagen autoexplicativa (obtenida del blog La Pizarra de Yuri, fair use)

En algún punto del camino se multiplicaron sus planos de montaje corporal: aparece el celoma y se inventa la segmentación**.** Parecía que con eso estaba todo hecho, pero era cuestión de interpretar las instrucciones: dónde poner la boca, dónde poner el ano. Una alteración provocó el que se crearan dos grupos de familias que ya no se encontrarían nunca más: por un lado se fueron los protóstomos -artrópodos, gusanos y moluscos- y por otro lado los

deuteróstomos -equinodermos y cordados-. La diversificación se produjo hace unos 590 millones de años. Aún hubo una última duda en la interpretación de las instrucciones que creó una nueva diversificación: los urocordados abandonaron a sus primos los cefalocordados, los cuales se quedaron solos en la senda hacia los vertebrados. A partir de entonces ya sólo se produjeron cambios de forma y tamaño, que se realizaban ajustando en el panel de control la afinación del crecimiento de las distintas partes del cuerpo, estableciendo para cada animal y cada órgano unos coeficientes distintos de desarrollo. La figura anterior nos permite visualizar esta afirmación con toda claridad.

Una vez dibujado el cuadro general de los avances morfológicos, nos acercaremos a algunos de ellos para tratar de entenderlos mejor. Veremos en los párrafos (y capítulos) siguientes que los procesos de diferenciación celular, simetría bilateral, segmentación y adopción de la notocorda, cuando alejamos nuestra perspectiva de la fría cadena cronológica y lo vemos como meros pasos del desarrollo embrionario, forman un conjunto imbricado y sin casi posibilidad de diferenciación entre ellos.

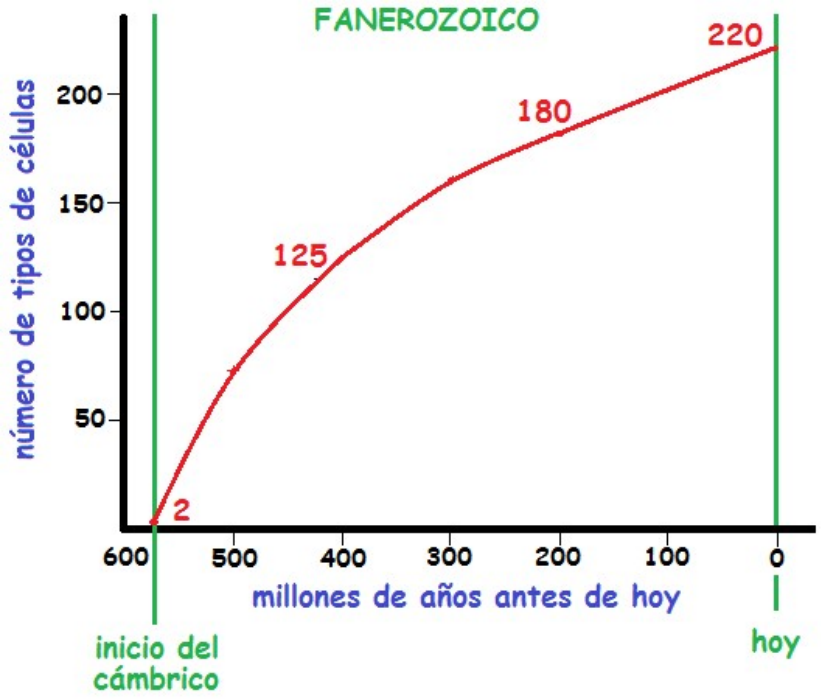
Empecemos por el principio, la diversidad celular.

Diversidad celular

James W. Valentine y otros colegas de la universidad de Berkeley en su artículo de 1994 "*Morphological complexity increase in metazoans*",[1] postulan que, así como la longitud del genoma podía ser un índice de la complejidad de las procariotas, la evolución del número de tipo de células especializadas –neuronas, epiteliales, musculares…- para la construcción del organismo de los metazoos es el mejor indicador para seguir la evolución de la complejidad morfológica en los animales. Idea que se visualiza en la curva de más abajo.

Veamos cómo se escaló la empinada curva de la figura posterior. Correría el año 780, en millones, antes de hoy, mucho antes de las esponjas y de extraños ameboides semejantes al actual *Trichoplax*

adhaerens, un animal plano compuesto por multitud de células, aunque ninguna de ellas especializada. En las aguas de aquel entonces, con toda seguridad algún ser vivo parecido, muy simple, comenzaba a explorar nuevas vías que aún tardarían mucho en concretarse. Alguna de estas opciones le llevaría a algo que se asemejaba a una especie de diferenciación funcional de las células.



Evolución del número de tipos diferentes de células en los animales

Las esponjas y el amorfo *Trichoplax adhaerens* -ver foto siguiente- carecen de órganos y de la mayoría de los tejidos. Pero sus antepasados abrieron el excitante camino de la diferenciación celular, el proceso por el cual a partir de una sola célula patriarcal fueron apareciendo por evolución diversos tipos de células, con cometidos tan diferentes como pueden ser los digestivos o locomotores.

Un primer indicio lo vamos a encontrar en las primitivas esponjas, de las que tenemos noticias ya en el periodo ediacárico, hace 650 millones de años. En ellas todas las células están preparadas para hacer cualquier tipo de trabajo. Se especializan llegados el

momento y la situación. No olvidemos que la estrategia de la esponja está a medio camino entre las cooperativas celulares y los tejidos. Junto a ellas los cnidarios tendrían ya unas unidades funcionales que actuaban como tejidos.



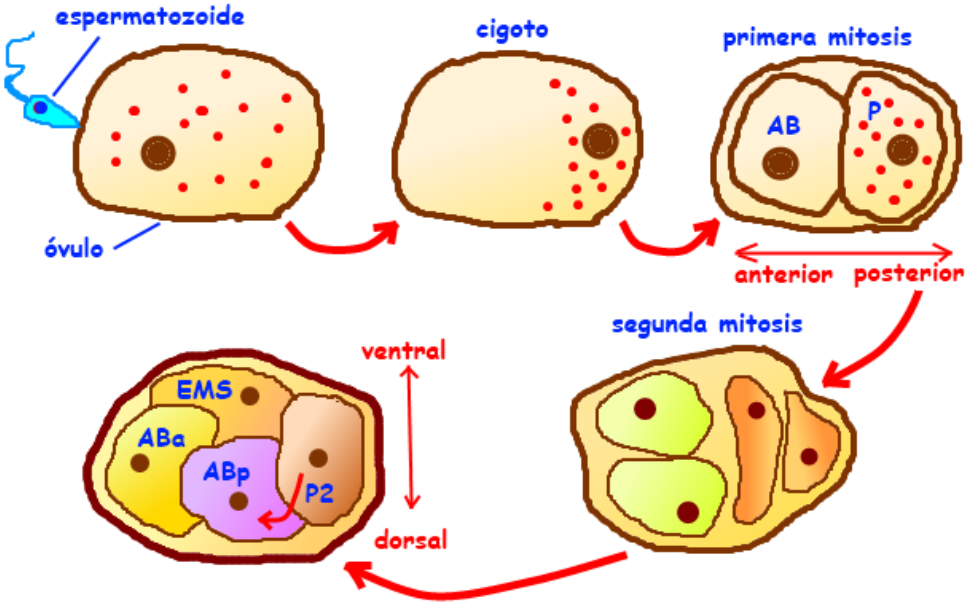
Trichoplax adhaerens con un tamaño aproximado de medio milímetro (Wikimedia, CC BY-SA 2.0 Germany)

Suele decirse que la historia anterior es el resultado de un "plan" drásticamente "decidido" por los genes y "sus" proteínas. Pero… ¿es eso cierto realmente? Veamos. Muchos seres vivos provenimos de la fusión de dos células con un solo juego de cromosomas, una masculina y otra femenina. Como resultado se produce una sola célula con un juego doble de cromosomas emparejados. Sobre esta célula, el cigoto, recae la ardua tarea encomendada por toda una historia de diferenciación celular, la tarea de generar todo un organismo completo, con tejidos que tendrán distintas funciones, cada uno de esos tejidos con un tipo de células específico.

Todas las células de un embrión contienen la misma carga de genes, por lo que deberíamos deducir que no son los genes por ellos mismos, por el mero hecho de tenerlos, los que condicionan la diferenciación celular. Lo que diferencia unas de otras debe ser el subconjunto de genes que cada una de ellas expresa, es decir, el tipo de proteínas que se sintetizan en cada tipo de célula.

Aunque es algo mucho más complejo puesto que ahora sabemos que la tradicional cadena gen-proteína-función no es la clave de la genética. Por contra la biología celular no sigue una cadena lineal causal sino que se comporta como una compleja red interconectada, dinámica, modulable y ajustable que trabaja desde los genes, hasta los complejos procesos de transcripción, la plasticidad de las proteínas, las influencias epigenéticas, las intercomunicaciones entre células o el "ruido" propio de lo que pasa en el abigarrado interior de ellas como se apuntó en el capítulo 13. Parece como si se necesitara muchas alternativas, incluso las más alocadas, para que la vida pueda escoger el camino homeostático adecuado. Algunos asimilan esta configuración relacional a la que llevan a cabo las neuronas en sus funciones cognitivas, emocionales o motoras. Realmente solo sabemos un porcentaje mínimo de lo que pasa. Aunque lo que sabemos es sorprendente.[2]

La influencia del paisaje proteínico dentro de la célula se desvela como el principal factor en ***la definición de los ejes principales del cuerpo***, delante/detrás y arriba/abajo, ya desde los primeros pasos de desarrollo del embrión. El proceso debe ser algo parecido a lo que se ha estudiado en el gusano *Caenorhabditis elegans,* del que, gracias a su simplicidad orgánica, que se reduce a 959 células cuando es adulto, se han llegado a conocer todos los misterios de su desarrollo, desde el huevo hasta el adulto. En líneas generales (ver figura de más abajo) se podrían resumir así: El espermatozoide penetra en el óvulo en una posición que definirá desde el primer momento un eje, e induce en el citoplasma del cigoto unicelular la creación de unos gránulos que son un conglomerado de proteínas. Estos gránulos se concentran en un extremo del cigoto. Cuando éste se divide en dos células, una de ellas se lleva la mayoría de los gránulos, la célula P, y con eso marcará en el posterior desarrollo la parte trasera del embrión. La otra célula, llamada AB, por el contrario, condicionará para siempre el polo anterior. Es decir, es el gradiente químico inicial de proteínas el que fija el eje antero/posterior del organismo maduro.



Dos primeras divisiones celulares del cigoto de Caenorhabditis elegans

Pasemos a la siguiente mitosis: de dos a cuatro células. La célula P se divide en P2 y EMS, y la AB en ABa y ABp. Por cuestión simplemente de tamaño del cigoto, la célula P2 sólo puede estar en contacto con la ABp, produciéndose un fenómeno de inducción mediante las proteínas que la primera envía a la segunda. Esta acción diferencia los dos tipos de células AB especializando a la ABp que en lo sucesivo fija el polo dorsal del embrión, formando con la célula EMS el eje dorsal/ventral.

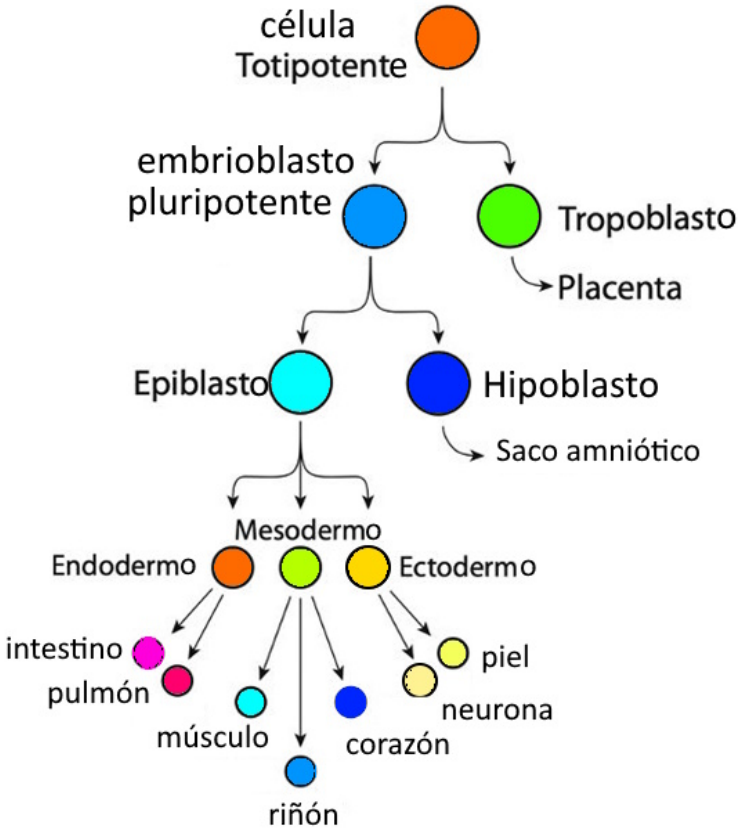
Al ser el *Caenorhabditis elegans* un animal extremadamente sencillo, el proceso anterior de los primeros pasos de su embrión nos da una idea de lo que pudieron ser los inicios históricos de la diversificación celular y la fijación de una simetría bilateral. Lo importante es fijar la idea de que *desde el momento inicial de la fecundación una cadena de activación de proteínas condiciona cómo va a ser el organismo futuro*, y de cómo por mecanismos de inducción entre células, que también se dan entre grupos de ellas para singularizar a los tejidos, se dibuja el mapa de diferenciación en el proceso de división celular.

Algo semejante se ha observado estudiando las planarias, unos platelmintos bilaterales. Su cuerpo tiene la capacidad de regenerar su cabeza o su cola si se las ha seccionado. Pues bien, en el laboratorio[3] se ha conseguido generar animales con dos nuevas cabezas, una delante y otra detrás, o invertir su vientre y su dorso simplemente manipulando cadenas específicas de genes, y por tanto las proteínas que expresan, que durante la embriogénesis definen en la mayoría de los animales sus ejes antero-posterior y dorso-ventral. Manipulando la que se conoce como vía de señalización Wnt/β-catenina que define el primero de estos ejes, se conseguía la aparición de una cabeza en donde antes había una cola, es decir, una planaria con dos cabezas. Manipulando la vía de señalización conocida como BPM se llegaba al giro dorso-ventral del animal, lo que se traducía en que en la parte ventral se habían generado estructuras dorsales. Es evidente que este estudio de laboratorio aporta una evidencia acerca de que el comportamiento específico de las células y las especializaciones de las estructuras de los organismos son consecuencia de determinados patrones proteínicos que se generan cuando ciertas señales extracelulares activan o inhiben los genes adecuados.

Desarrollo del cigoto en los animales placentarios

El cigoto unicelular, formado por fusión de los gametos masculino y femenino, comienza una actividad frenética de divisiones mitóticas: una célula, dos células, cuatro células, ocho… y así en un proceso constante e interminable. En los primeros días va a pasar a través de tres fases de división celular: mórula, blástula y gástrula. Inicialmente todas las células son totipotentes: "*una célula de este tipo puede formar no solo las células pluripotentes que pueden desarrollarse en todos los tejidos del embrión, sino también los otros tipos de tejidos que lo sostienen: el trofoblasto, que se convierte en la placenta, y el hipoblasto que se transformará en la pared del saco vitelino. En primer lugar, una célula madre totipotente puede optar por convertirse en una célula trofoblástica (placentaria) o en una célula de la llamada masa celular interna o embrioblástica. Estas últimas se dividen en*

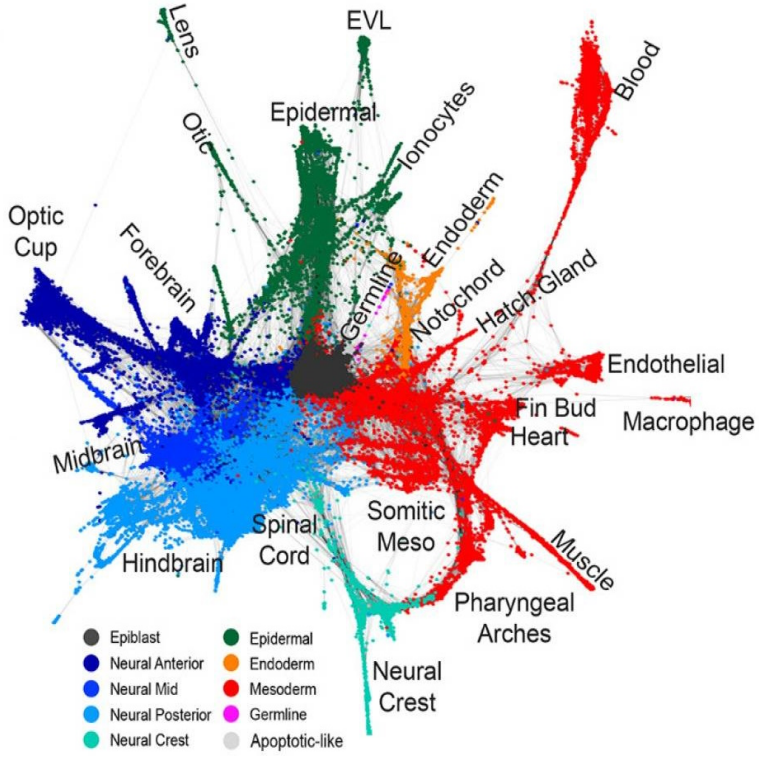
células epiblásticas, que se convertirán en el feto, y células hipoblásticas (saco vitelinas). Luego, la vía del epiblasto se divide en tres canales, correspondientes a los tipos de células llamados ectodermo, mesodermo y endodermo. Las células del ectodermo normalmente se convertirán en células neuronales de la médula espinal, el sistema nervioso y el cerebro; las células del mesodermo se convierten en órganos internos, como los músculos, el corazón y los riñones, y en células sanguíneas; y el endodermo forma los pulmones y el intestino, entre otras cosas".[4]



Las trayectorias de desarrollo de los linajes celulares desde la totipotencia hasta los tipos de tejidos completamente diferenciados. (Modificado de "How life works", Fig. 6.7, Philip Ball, 2023, fair use)

El esquema anterior no está completamente asegurado desde el principio: es contingente pero probable. Una célula no "decide" su futuro de forma precisa y unívoca desde su nacimiento, sino que va

siguiendo un camino errático impulsado por su situación del momento: su estado transcripcional de ARN's no codificantes o proteínas, la mayor o menor aparición o desaparición de proteínas que producen "pegajosidad" entre ellas, los "empujes" a que se ven sometidas en las migraciones y plegamientos o las comunicaciones con sus compañeras de viaje, entre otras circunstancias. La aleatoriedad que esculpen las dificultades explicadas en el capítulo 13 acerca de los procesos de transcripción génica. No todas las que parecen iniciar un claro camino lo terminan, pudiendo llegar a un estado definitivo final en el que va a realizar otras funciones distintas a las inicialmente apuntadas.



Las trayectorias de la expresión génica a medida que las células del embrión de pez cebra adquieren su destino. (Artículo "Single-cell mapping of gene expression landscapes and lineage in the zebrafish embryo",[4] Daniel E. Wagner et al., 2018. Fig. 6.8, Fair use)

Hoy en día hay increíbles técnicas para estudiar estos cambios y saber la característica de la célula correspondiente en cada

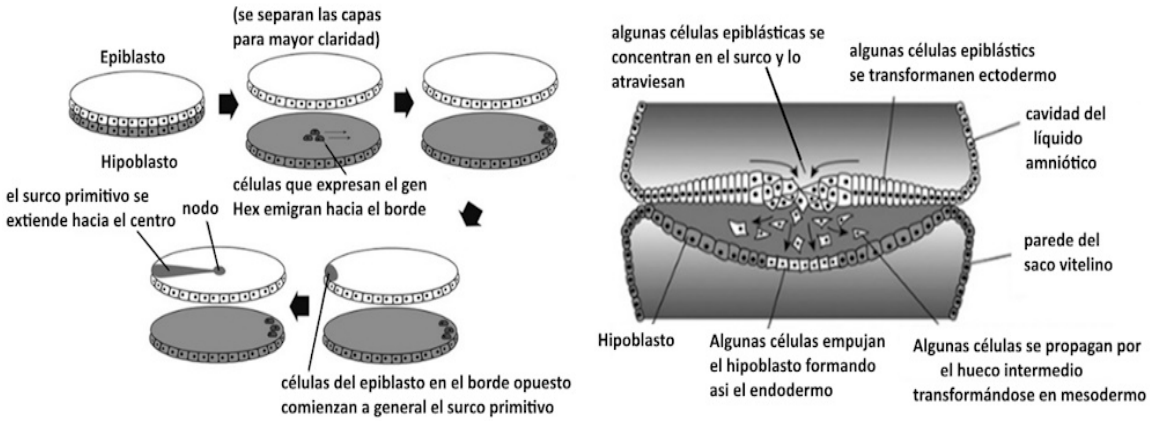
momento y en cada sitio. Dan Wagner, Sean Megason y Allon Klein, investigadores de la Facultad de Medicina de Harvard, en 2018 publicaron los resultados de un estudio realizado sobre más de 92.000 células de embriones de pez cebra durante el primer día de su desarrollo.[5] Los resultados los "mapearon" como una especie de flujos por donde estaban transitando las células. Lo podemos ver en la imagen anterior donde, por ejemplo, se puede ver como múltiples células epiblásticas se han movido por diversas vías para llegar a conformarse como de la copa óptica. No hay un único camino directo, sino unas variadas vías de expresión que parece aleatorias. Pero así funciona la realidad.

Todo sucede como si cada célula "rodara" cuesta abajo por lo que se conoce como paisaje de Waddington[6] cuya topografía sería la inversa de una configuración hidráulica habitual: en vez de iniciarse aguas arriba como una multitud de pequeños valles que se van uniendo hasta hacerse uno, en el de Waddington comienza una sola célula a deslizarse desde un estado único inicial totipotente para en cada bifurcación posterior tomar la decisión de qué destino optar. Con una aleatoriedad añadida ya que la configuración del paisaje también puede ir cambiando momento a momento de acuerdo al estado epigenético. Es como si en cada momento, dentro de lo contingente y en el núcleo mismo del proceso, existieran una serie de atractores ocultos -similares a los postulados por la Teoría del Caos- que orientan al sistema hacia un patrón de actividad estable. Concepto que volveremos a encontrar cuando analicemos la formación de tejidos especializados. Pero volvamos al proceso de embriogénesis.

Tras las primeras tandas de divisiones se forma una especie de mora, una esfera de células dispuestas en una sola capa, hueca, llamada blástula, que evoluciona en pocos días hacia una diferente estructura, la gástrula. Con posterioridad la blástula entra en gastrulación, proceso por el que se transformará a las dos semanas, más o menos, en la gástrula que con posterioridad va a formar las capas germinativas del embrión (endodermo, mesodermo y ectodermo). Además durante su desarrollo también se va a

establecer la simetría corporal siendo el inicio del plan básico del cuerpo. Por esas razones, en el campo de la bioética y el derecho es ampliamente aceptado el límite de 14 días como el punto máximo para experimentar con embriones in vitro, ya que es cuando comienza la gastrulación.

Hacia el día 15 o 16 la gástrula va tomando una forma de disco aplanado, inicialmente de dos capas celulares, adaptándose sobre la yema alimenticia (saco vitelino) que aportó el gameto femenino y quedando cubierto y protegido por una estructura que luego va a desarrollar la placenta y el sistema de intercomunicación sanguínea madre-embrión. Como se ha dicho, ese "disco" está formado por dos capas de células: arriba el epiblasto de donde se va a derivar el embrión y abajo el hipoblasto que conformará el saco vitelino.



Formación del surco primitivo (izquierda) y de las tres capas epiblásticas (derecha) (Imagen modificada de "How life works", fig. 7.3, Philip Ball, fair use)

Lo primero que le sucede a la gástrula es que algunas células en el centro del disco del hipoblasto comienzan a especializarse en relación con las que están en los borde para luego literalmente desplazarse por la capa del hipoblasto hasta el borde del disco. No importa hacia qué borde; mientras las células especializadas permanezcan juntas, su movimiento establece que un lado del disco es diferente del otro. Las células del epiblasto que se encuentran encima de la congregación de las que emigraron, comienzan a

establecer el surco primitivo que se va extendiendo hacia el centro de la capa epiblástica estableciendo un eje de polaridad que va a definir la cabeza y la cola del embrión. A medida que crecen las células deformando la lámina epiblástica, el surco primitivo crea un pequeño hoyuelo (nodo), lugar desde donde algunas células migran de la capa epiblástica acumulándose en una nueva capa debajo de ella. Con el tiempo las células que permanecen en el epiblasto se diferenciarán formando el ectodermo; las células que migran formarán el mesodermo y el endodermo. Así, el embrión propiamente dicho se convierte en un sándwich de tres capas, en el que cada tipo de célula producirá tipos específicos de tejido (ver el árbol de la imagen de más arriba).

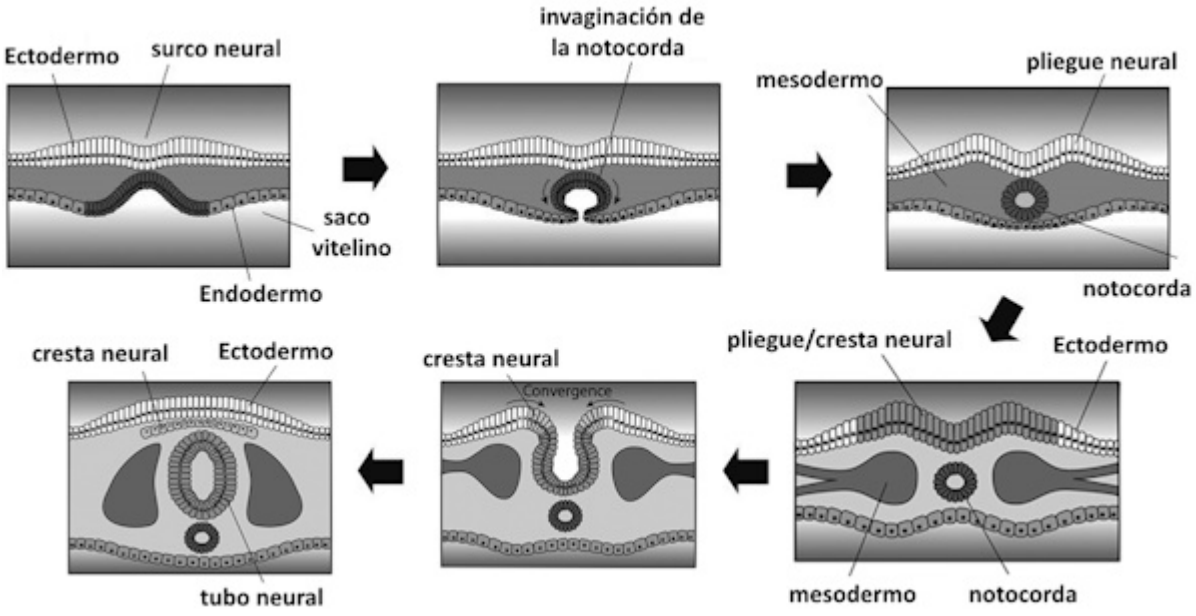
Vemos como en este complejo proceso existe una delicada interacción bidireccional entre las señales de arriba hacia abajo y las órdenes de abajo hacia arriba. Al hablar de una interacción bidireccional entre señales de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, nos estamos refiriendo a dos tipos de comunicación celular que ocurren simultáneamente y que son cruciales para que las células se comporten correctamente durante el desarrollo:

1. ***Señales de arriba hacia abajo***: Son señales externas que una célula recibe desde su entorno, desde células vecinas en el tejido (en este caso, desde capas superiores del epiblasto). Estas señales pueden ser moléculas mensajeras, factores de crecimiento o señales químicas que "indican" a la célula qué hacer o cómo responder. Por ejemplo, una célula recibe instrucciones para activarse o para iniciar un proceso específico como migrar o cambiar su forma.

2. ***Señales de abajo hacia arriba***: Son las respuestas internas de la célula que pueden influir hacia arriba, es decir, que afectan a capas o células superiores, o incluso modifican cómo la célula misma regula sus genes. Estas señales surgen dentro de la célula a partir de su estado interno, de cómo procesa la información recibida y de las interacciones con su propio núcleo o con su citoesqueleto. Por ejemplo, la activación de

ciertos genes dentro de la célula puede producir proteínas que a su vez envían señales a otras células o modifican la estructura tisular.

3. ***Señales mecánicas***: No podemos olvidar en el abanico de influencias el que producen las proteínas que influyen sobre la "pegajosidad" entre células, lo que va a permitir su desplazamiento por el tejido, y la aparición de plegamientos en los mismos o la deformación de la propia forma celular. Eso es así porque entre las células existen canales de comunicación a través de proteínas incrustadas en sus membranas, comunicación que a veces puede verse comprometida o variada cuando la membrana se deforma gracias a un "empujón" durante el plegamiento o la migración, o gracias a que existe un "flujo" en su alrededor. Por ejemplo, la presión del bombeo de sangre en el embrión es "sentida" por las células en los tejidos en crecimiento y lanza un interruptor bioquímico que activa los genes que afectan el destino final de las células cardíacas. El corazón impulsa y da forma a su propia formación en virtud de su propia función.



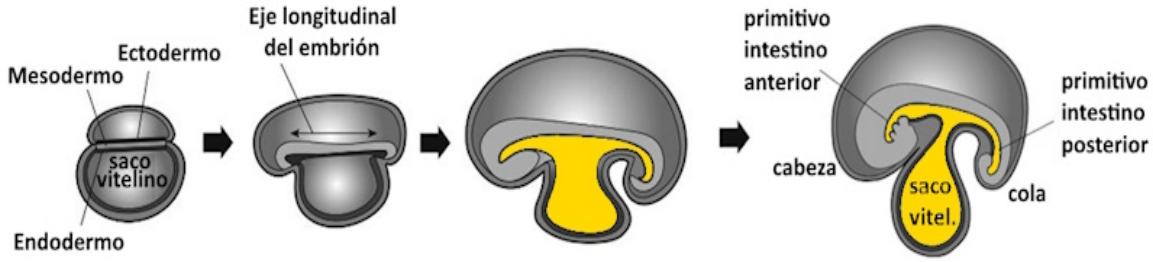
Formación de la notocorda y del tubo neural (Imagen modificada de "How life works", figs. 7.4 y 7.5, Philip Ball, fair use)

Lo que sucede a continuación es que el eje de simetría bilateral se vuelve más definido. La sección central de la capa del endodermo se dobla hacia arriba y se engrosa, dividiendo el mesodermo por encima de ella en dos mitades. Este engrosamiento forma luego una protuberancia, que se separa del endodermo para convertirse en una estructura en forma de vara que se extiende entre las dos capas, desde la "cabeza" hasta la "cola", llamada notocorda que ayuda a endurecer el embrión proporcionando una especie de soporte esquelético hasta que se forma la columna vertebral propiamente dicha. Su función principal es dispensar señales químicas a los tejidos circundantes, señales que especifican en qué órganos y tejidos se convertirán. Con esto queda preparado el terreno para la expresión secuencial y espacial de los genes *Hox*, que definirá las identidades regionales del mesodermo (como los somitos), del tubo neural y de otros tejidos, dando inicio así al proceso de regionalización y segmentación del eje corporal del embrión (de ello hablaremos en el capítulo 24).

Volviendo a la notocorda, se observa, en primer lugar, que tras su implantación se liberan moléculas de señalización que llegan al ectodermo por encima de ella y hacen que las células del centro de esa capa cambien de forma, volviéndose más parecidas a una cuña, lo que hace que el ectodermo se doble hacia la notocorda. El crecimiento continuo de células en la capa del ectodermo acentúa la protuberancia hasta que los pliegues a ambos lados se tocan y se fusionan, creando una estructura en forma de tubo llamada *tubo neural*. También las moléculas de señalización hacen que las células alrededor del tubo neural se conviertan en células de la "*cresta neural*", que con posterioridad se convertirán en una variedad de tipos de tejidos, incluido el sistema nervioso, la glándula suprarrenal, las células pigmentarias y partes de la cara. El tubo neural se desprende completamente del ectodermo, para con el tiempo convertirse en la columna vertebral y el sistema nervioso central, incluido el cerebro.

Tras esta fase, el embrión comienza una etapa de invaginación por su extremo de cola, generándose una especie de tubo interno a la

estructura externa, casi como un tubo dentro de la cavidad tubular que forma el ectodermo. Estamos hablando del proceso de generación del intestino el cual se forma a partir del endodermo, la capa de tejido que se enfrenta al saco vitelino del embrión. Como decimos, el endodermo se vuelve tubular en las extremidades anterior y posterior a medida que el cuerpo del embrión se alarga para producir un rizo inferior en cada extremo, lo que le da al embrión una forma de hongo con el saco vitelino como tallo.



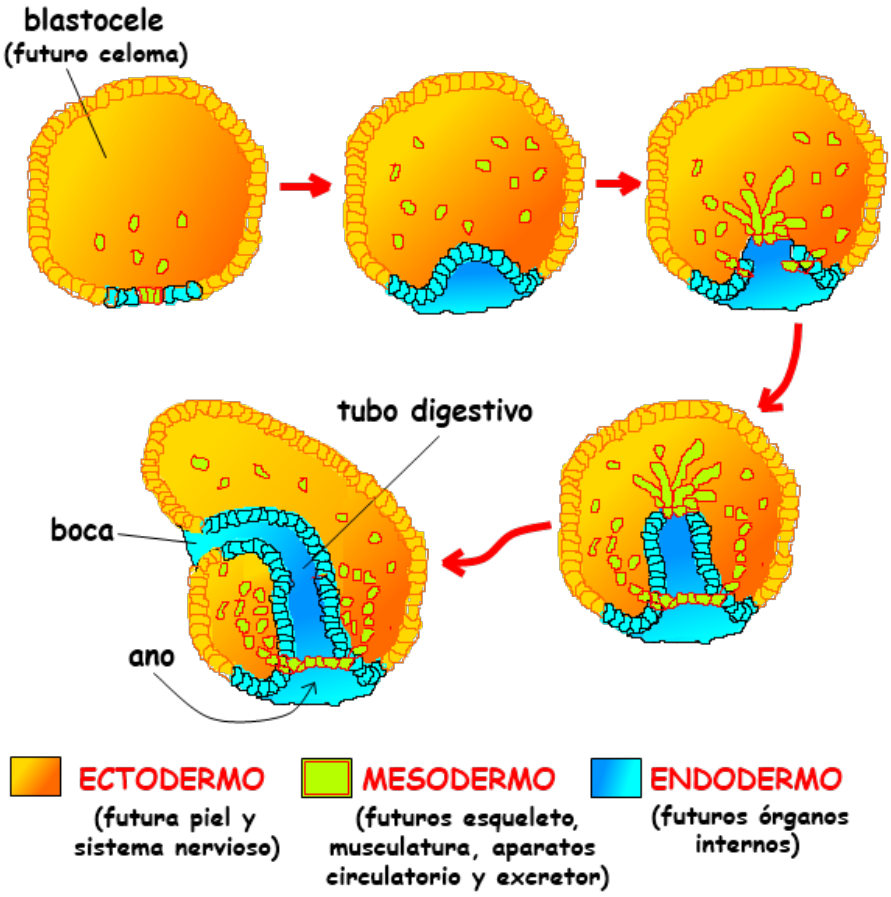
Formación del intestino en el embrión (Imagen modificada de "How life works", fig. 7.6, Philip Ball, fair use)

Con ello el embrión queda definido como algo parecido a dos huecos que podríamos considerar concéntricos, el intermedio ecto-endodermo, que formará la cavidad interna del cuerpo, ***el celoma***, que en los vertebrados acabará formando el tórax y abdomen, y el interno, que con el tiempo llegará a ser el tubo digestivo, definiendo el ano y la boca. Por ser una característica taxonómica que define las familias de *deuteróstomos* –equinodermos, tunicados y vertebrados- y *protóstomos* –gusanos, moluscos, insectos, crustáceos, arañas, escorpiones, ciempiés- comentaremos que en los segundos el primer orificio que se genera es la boca, mientras que en los deuteróstomos, como los mamíferos, es el ano (*ver imagen de más abajo*).

El celoma merece una mención especial ya que hay teorías que apuestan por el hecho de que en este hueco corporal interno está el origen de un aparato locomotor complejo. Permitió a los animales celomados el "contorsionar" su cuerpo mediante el bombeo de líquido a través del celoma con lo que se producía un movimiento más versátil que el que se conseguía mediante cilios y flagelos, o

con deformaciones de tipo ameboide. Esta gran ventaja les puso en bandeja, al poder moverse tunelando, un importantísimo nicho de alimentos como era el fangoso fondo marino repleto de residuos orgánicos acumulados durante milenios.

Tengo que decir que la aparente "predeterminada perfección" de los procesos explicados me deja personalmente un inquietante poso. Por lo que creo que procede, además de quedar mareados ante la aparente precisión de los procesos anteriores, preguntarnos con asombro ¿Cómo saben las células lo que deben hacer? ¿Cómo pueden tener un objetivo compartido si solo son unidades individuales?



Fases iniciales del desarrollo embrionario durante la fase de gastrulación

La biología actual se cuestiona que los genes por sí solos, basten para explicar este nivel de coordinación, y sugiere que el

conocimiento colectivo y contextual de las células es clave en la construcción y reparación del organismo. Las células se comportan como entidades activas e inteligentes, no solo como bloques pasivos de construcción del cuerpo, que gracias a una intrincada red de relaciones parecen "calcular" posibles formas corporales dentro de un paisaje morfogenético con estados estables, gracias a lo que más arriba hemos definido como "atractores". Su coordinación y organización se logra gracias a complejas redes de comunicación que guían el desarrollo, la forma y la función de los organismos vivos. Las células no siguen un plano fijo (que encuentran en los genes), sino que organizan el desarrollo a través del diálogo constante entre ellas, interpretando señales internas y externas para tomar decisiones colectivas.

Existen ***diversos modos de comunicación celular***: *el químico* mediante el uso de neurotransmisores, hormonas y otras moléculas para activar respuestas internas. Por ejemplo, las sinapsis neuronales. *El mecánico* gracias a que diversos cambios físicos, como estiramientos, activan canales en la membrana celular, influenciando su comportamiento. *El eléctrico* por el que las células regulan su voltaje mediante canales iónicos, lo que permite procesamiento de información, sincronización y formación de patrones. *Las uniones gap* (o de hendidura) son canales proteicos que conectan células adyacentes, permitiendo el intercambio de señales eléctricas y químicas. Cambios en la señalización eléctrica pueden modificar radicalmente el resultado morfológico (por ejemplo, las planarias que al ser inducidas pueden regenerar en sus organismo cabezas de otras especies). También el comportamiento celular cambia según la rigidez del entorno (superficies blandas inducen neuronas, rígidas inducen células óseas). De la misma manera los cambios físicos en la célula pueden alterar la expresión genética. Todo ello sugiere la existencia de una memoria del patrón corporal que no está en el genoma, sino en el estado colectivo eléctrico de las células. La forma no está predeterminada genéticamente, sino influenciada por procesamiento distribuido de información en los tejidos.

Las reglas que guían el desarrollo biológico no son prescriptivas, sino que ***permiten múltiples resultados*** dentro de ciertos márgenes, lo cual explica tanto la diversidad como la aparición de "anomalías" o condiciones inusuales. Lo "normal" es un rango amplio y no una forma única. Muchas personas viven con condiciones genéticas o estructurales sin consecuencias funcionales graves. Todo es debido a que la vida sigue reglas emergentes estructurantes y flexibles, no instrucciones precisas. Por ello, el desarrollo no siempre produce un único resultado, sino una variedad de posibles formas (algunas viables, otras no). Esto implica que las "anormalidades" no sean errores, sino expresiones legítimas de la variabilidad natural del desarrollo biológico. Enfermedades y malformaciones no son necesariamente "fallos" sino atractores alternativos dentro del sistema.

Esa capacidad de navegar en la contingencia de una red en donde se intercambian señales de "abajo hacia arriba", "de arriba hacia abajo" y "de mitad hacia afuera", que no olvidemos ha mimado la evolución, da un plus de resiliencia a los organismos ante errores, porque los caminos de interrelación son múltiples y siempre el sistema tendrá disponible algún canal para enmendar decisiones dañinas o no viables. La capacidad de integrar información para responder a lo inesperado es una condición fundamental de todos los sistemas vivos. Esta perspectiva sugiere que la vida no se define solo por metabolismo y replicación, sino por su capacidad de cognición y orientación intencional. ***La vida debe entenderse desde la cognición***, no como conciencia necesariamente, sino como procesamiento adaptativo de información orientado a objetivos. Esta visión permite comprender mejor tanto el comportamiento de las células como la emergencia de estructuras biológicas más complejas.

Esa capacidad de navegar en la contingencia de una red en donde se intercambian señales de "abajo hacia arriba", "de arriba hacia abajo" y "de mitad hacia afuera", que no olvidemos ha mimado la evolución, da un plus de resiliencia a los organismos ante errores, porque los caminos de interrelación son múltiples y siempre el

sistema tendrá disponible algún canal para enmendar decisiones dañinas o no viables. La capacidad de integrar información para responder a lo inesperado es una condición fundamental de todos los sistemas vivos. Esta perspectiva sugiere que la vida no se define solo por metabolismo y replicación, sino por su capacidad de cognición y orientación intencional. La vida debe entenderse desde la cognición, no como conciencia necesariamente, sino como procesamiento adaptativo de información orientado a objetivos. Esta visión permite comprender mejor tanto el comportamiento de las células como la emergencia de estructuras biológicas más complejas.

En este momento de la Biografía de la Vida hemos llegado a la realidad de un incipiente organismo triblástico, en el que ya encontramos atributos de bilateralidad, una cavidad interna -el celoma- y segmentación, dispuesto a seguir su camino. Antes de continuar con el análisis de estos avances orgánicos vamos a hacer de nuevo una pequeña digresión sobre un aspecto crucial de la diferenciación celular: el caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del "altruismo". Lo que veremos en el siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 22:

1. "*Morphological complexity increase in metazoans*", James W. Valentine et al, Febrero 2016. Cambridge University Press.

   [https://www.cambridge.org/core/journals/paleobiology/article/abs/morphological-complexity-increase-in-

metazoans/9EE2E02A3B9E1C72A78B21A9B8A92BB0?utm_source=chatgpt.com]

2. Recomiendo la lectura del libro "*How life works*" de Philip Ball, 2023.
3. Según el artículo "*Gradients in Planarian Regeneration and Homeostasis*" de Teresa Adell et al, 2010, Cold Spring Harbor Laboratory Press.

   [https://cshperspectives.cshlp.org/content/2/1/a000505.full]

4. Dice Philip Balls en el capítulo 6 de su libro "*How life works*".
5. "*Single-cell mapping of gene expression landscapes and lineage in the zebrafish embryo*", Daniel E. Wagner et al., 2018. [https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29700229/]
6. El paisaje epigenético de Waddington es una metáfora visual creada por el biólogo Conrad Hal Waddington en la década de 1940 para explicar cómo las células embrionarias se especializan o diferencian durante el desarrollo.

23. El caso de la célula que se diferenció por la vía del “altruismo”

En el capítulo anterior nos habíamos introducido en el asombroso mundo de la complejidad. Conocemos ya por tanto los mecanismos por los que los seres vivos del reino Animalia pudieron llegar a diferenciar sus células para que realizaran funciones muy variadas. Hoy nos vamos a centrar en un caso muy particular, que en principio puede parecer un contrasentido: El caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del “altruismo”.

Todos percibimos al organismo vivo, al conjunto de células y tejidos, como la “nave” portadora de las células reproductoras, que a su vez son meras herramientas de los genes, que las utilizan para su replicación y dispersión.

En el campo de la diferenciación celular y posterior especialización de tejidos, es muy peculiar el *hecho por el cual aparecen células somáticas separándose de las germinales*. Resulta curioso al preguntarse cómo es que en un conjunto de células, todas procedentes de un mismo cigoto inicial y por tanto con idéntica carga genética, algunas deciden “sacrificar” su mayor razón de ser, el reproducirse y dar nuevos seres independientes, quedando como simples células estructurales de un cuerpo, favoreciendo así a unas pocas, los gametos, que sí se especializarán en la reproducción. Parece un contrasentido, y sin embargo la opción, basada en la colaboración, se ha demostrado de un gran éxito.

Dejando al margen el hecho que parece evidente que la cooperación lleva consigo un vector de beneficio para los cooperantes, la explicación de que existan esta serie de células “altruistas” se basa en la idea de que para ellas **también resulta valioso** el conseguir que genes que son portados por una célula hermana, es decir genes iguales que los suyos, pasen a la siguiente

generación, lo que asegura también su objetivo, que es tan sencillo como el hecho de que su acervo genético se perpetúe. La mejora del éxito de los parientes puede a veces compensar la pérdida de oportunidades que sufren los individuos altruistas.

Este concepto de *"selección familiar"* (*kin selection*), que fue ideado por el biólogo evolutivo británico William D. Hamilton para explicar el comportamiento social de algunos insectos, es perfectamente aplicable a nivel de célula: el ayudarte a ti supone una mejora para mis intereses. Dentro del conjunto de células hermanas alguna proteína da la señal externa "soy pariente tuyo", señal que les ayuda a reconocerse y comportarse como un único ente evolutivo. Con el paso del tiempo se generó algún proceso de regulación tipo gen Hox (veremos en otro capítulo quiénes son) que se encargaría de decidir qué célula de todas ellas sería la abanderada en la carrera de pasar el testigo genético.



Termitas Coptotermes formosanus un ejemplo muy evidente de sociedad de insectos movida por selección familiar. En colonias de tres millones de individuos sólo hay una pareja real reproductora. Otros individuos pueden coger el relevo en caso de envejecimiento de los anteriores o pueden ser los pioneros que se encarguen de generar nuevas colonias lejos de la propia de nacimiento (Wikimedia, dominio público)

El propio Hamilton consideró una norma aún más general que la anterior, que en teoría no tenía por qué exigir un comportamiento a

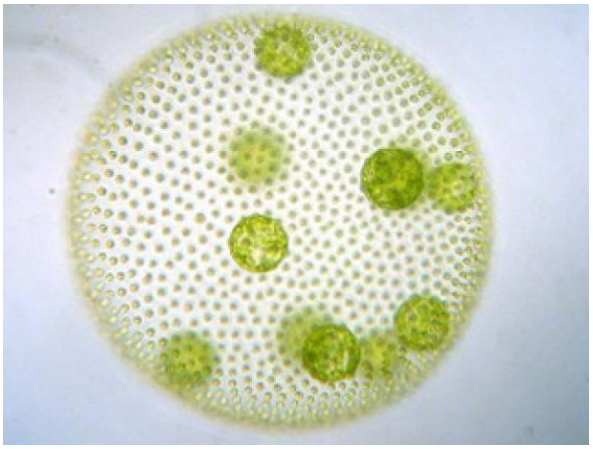
ultranza de renuncia altruista. Partió de la misma idea: una nueva generación de genes como los "míos" puede surgir por dos vías, o a través de mi propia descendencia o bien a través de la descendencia de mis parientes. Por lo que lo más eficaz es *optimizar la suma de ambas vías*, lo cual no implica la renuncia de mi propia descendencia. A esta teoría se le llamó *"eficacia total"* (*inclusive fitness*) y puede propiciar respuestas parcial o totalmente "altruistas". En algún momento el individuo puede optar por reproducirse y en otros momentos por ayudar a que sus hermanos, por ejemplo, tripliquen su tasa reproductiva, opción con la que se incrementa en un 50% el éxito total del conjunto. De una proyección de los genes por dos vías, a una proyección por una vía única, pero de eficacia triple.

En realidad no es que una célula, o sus genes, tengan voluntad o decidan lo que hacer, sino que en un momento determinado, y por motivos circunstanciales, aparece en un ser **estructuralmente sencillo** un gen mutado que es "altruista", o bien una novedosa interrelación "altruista" entre genes, circunstancia que al maximizar la "eficacia total" maximizaba la expansión de estos genes. Como resultado inmediato estos se propagan y llegan a buena parte de la población, generalizándose así la expresión "altruista". Con el paso del tiempo se va pasando del sencillo organismo inicial a otros organismos más complejos, con más células y más especializadas, en los que continúa en sus genes la ventaja de la eficacia de la característica "altruista". Incluso incrementándola, ya que se ve combinada con las nuevas ventajas de pertenecer a un organismo más complejo, de vida más larga y con una fase reproductora más extensa a lo largo de su existencia, lo que amplía sustancialmente las oportunidades efectivas de reproducción de sus copias.

A la vista de los patrones tan similares que podemos contemplar hoy en día a nuestro alrededor en algunos organismos vivos, este proceso no debió resultar un gran contrasentido en los momentos iniciales del invento del "altruismo". No deja de ser un ejemplo más de cooperación de individuos con una misión, que es el éxito

del objetivo del conjunto, la propagación de su genoma. Este comportamiento se asemeja mucho al de la cooperación de células dentro de un organismo individual. Veamos pues algún ejemplo actual de lo que decimos.

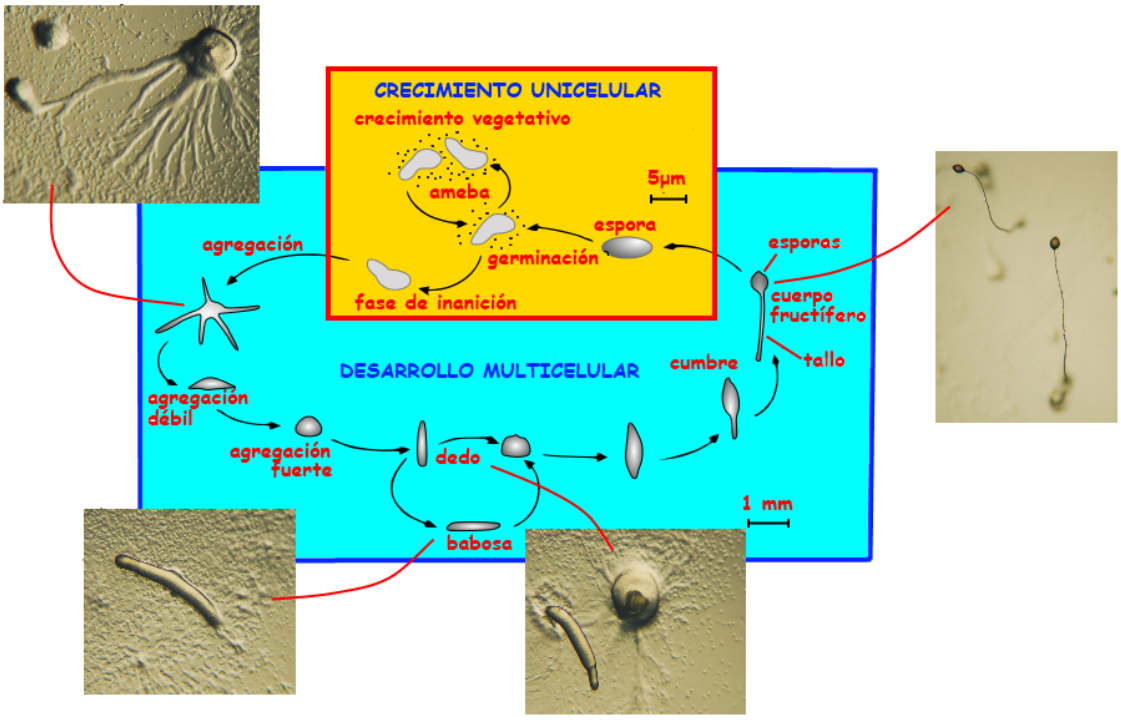
Uno de ellos es la esfera acuática hueca formada por las algas unicelulares flageladas Volvox, que adoptan esta forma de organismo societario quizás como una estrategia contra la depredación mediante el truco del incremento de tamaño. Todas las células son estructurales y están unidas por conexiones citoplasmáticas, formando la superficie de la esfera. Menos unas pocas que adoptan la función reproductora, las oosporas, y que aparecen en el ecuador de la esfera para más tarde mudar a su interior. Para liberarlas, la esfera se da literalmente la vuelta como un calcetín, suelta sus células sexuales y se rehace al revés. La pregunta que queda en el aire es: ¿por qué algunas células se transforman en germinales y el resto, que trabajan para ellas, no?



Volvox aureus con las oosporas, de mayor tamaño, en su interior (Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

Otro ejemplo más curioso si cabe es el de los mohos mucilaginosos acrasiomicetos colonizadores de muy diversos medios, como el *Dictyostelium discoideum* de la imagen siguiente. Se trata de seres unicelulares, de constitución ameboide, que en condiciones de bonanza medioambiental y de alimentación, hacen su vida de forma independiente. Sin embargo, cuando el entorno se hace

agresivo para su supervivencia comienzan a excretar una sustancia llamada “adenosín monofosfato cíclico”, una señal química que cuando contacta con otro individuo le excita para que segregue a su vez más producto “llamada”, induciéndole a moverse hacia un punto de reunión que resulta ser el lugar donde esta sustancia presenta una mayor concentración.



Proceso donde se describen los distintos estadios por los que pasa el cuerpo fructífero de Dictyostelium discoideum (a partir de Wikimedia, esquema, GFDL 1.2 y fotos, dominio público)

En este punto se acumulan una gran cantidad de células, formando una especie de brazo vertical que con el tiempo bascula y se coloca horizontalmente sobre el suelo. Allí empieza un movimiento sincronizado de toda la colonia de ameboideos, haciendo que la masa se mueva como una babosa. Cuando llegan a un lugar iluminado se produce una revolución: la babosa se yergue sobre unas cuantas de sus células que quedan formando un pedúnculo con su base sustentadora, y otras “trepan” hacia la luz, estirando el nuevo cuerpo de la colonia. El 80% de células consiguen una posición elevada que les dará carta de reproducción y originarán una nueva generación de esporas. El 20% de la base sólo quedarán

como eso, como soporte de las que se van a reproducir, para luego morir. ¿Qué es lo que diferencia a unas de otras de forma que realicen unas funciones tan dispares? ¿Cuál es la señal que convierte a algunas células en altruistas? ¿Es algo parecido al proceso de diferenciación celular con gradientes químicos como motores de la diferente expresión de los genes en cada individuo? ¿Es consecuencia de la evolución dentro de la "eficacia total" de Hamilton, aunque pueda ser que las amebas iniciales no fueran parientes?

De todas formas, se ha descubierto que no todo es tan bonito y "generoso" en los mucilaginosos, extensible a otras células cooperantes. Algunas células engañan al sistema haciendo trampas para darse a ellas mismas más probabilidades de sobrevivir. Y como sucede con todos los tramposos, los trucos deben de estar evolucionando constantemente para contrarrestar las contramedidas que la comunidad aplica como defensa de su eficacia reproductiva. De todas formas el engaño sólo funciona si se realiza en presencia de "no tramposos": se da el hecho de que si los "tramposos" están rodeados de otros iguales, todos se hermanan y de nuevo contribuyen en grupo al esfuerzo colectivo, como si no hubieran sido carteristas profesionales.

No es evolutivamente concebible un futuro en el que el gen de las trampas se hubiera diseminado por toda la población, ya que entonces la carrera competitiva que se generaría no permitiría formar el cuerpo fructífero al faltar células para su base (no habría altruistas, todas serían tramposas), por lo que no podría reproducirse ninguna y desaparecerían como especie.

¡Cuántas lecciones evolutivas nos hemos encontrado al seguir la pista de las células "altruistas"! Es sorprendente cómo los resultados de la evolución, consecuencias maquinales de las circunstancias ambientales, se ajustan a parámetros racionales o de comportamiento de los humanos. ¿Será acaso que somos resultado de esta evolución?

En el siguiente capítulo continuaremos con la historia de los organismos multicelulares triblásticos, aquellos cuyas células habían aprendido a colaborar especializando sus funciones hasta el grado extremo de no hacer uso de su capacidad reproductora en aras a una mayor eficiencia. Seguiremos analizando sus características de bilateralidad y la capacidad de segmentación que ya llevaban implícitas en sus organismos.

24. Dos nuevas habilidades: Bilateralidad y segmentación

En los capítulos anteriores comenzamos a desarrollar lo que llamaba la evolución de la complejidad. Cómo los seres del reino Animalia fueron evolucionando sus organismos hasta los fenotipos habituales para nosotros, habitantes del siglo XXI. En el capítulo 22 hablamos del concepto de la diferenciación celular, y en el siguiente, el 23, desarrollamos un curioso caso particular, el caso de la célula que decide diferenciarse por la vía del "altruismo".

Ahora continuaremos con la tarea tratando brevemente la conquista de la simetría bilateral para seguir con el sorprendente proceso de la segmentación corporal.

El camino de la simetría bilateral

Estamos situados en el planeta Tierra de hace 600 millones de años. Nos tenemos que adentrar en el periodo ediacárico -o quizás cien millones de años como algunos opinan- época de donde tenemos datados fósiles de los que se duda si son de la biota ediacara o bien formas aún más primitivas de seres vivientes.

El fósil más antiguo de este tipo, ya bilateral, es *Vernanimalcula* descubierto en la formación Doushantuo en China. Su identificación está en discusión, ya que algunos especialistas lo consideran la parte interior de un saco de huevos o quizás un acritarco. Ejemplos más recientes, aceptados casi universalmente como bilaterales, incluyen a *Kimberella* (de la que ya hablamos en el capítulo número 19 sobre el Cámbrico), parecido a un molusco, *Spriggina* (¿anélido o artrópodo?) y *Parvancorina*, con forma de escudo y parecido a un trilobites del Cámbrico.



Spriggina flounensis (Wikimedia, GFDL 1.2)

A la vista de la gran cantidad de animales, vivos o extintos, que desarrollan una simetría bilateral en sus organismos, hay que afirmar que este tipo de morfología debe presentar una serie de ventajas evolutivas de gran éxito. Intentaremos imaginar cuál fue el camino y el porqué del paso desde la forma ameboide a la estructura corporal bilateral.

Cuando estudiamos el mecanismo de especialización en el capítulo 22, "*El camino de la diferenciación celular*", hablamos de que el sistema de expresión de los genes maternos había seleccionado una proteína que fijaba el inicio de la simetría de su embrión. ¿Por qué pasó eso? Una consecuencia más del poder evolutivo de la selección natural. Dejemos que nos lo cuente el magistral zoólogo Richard Dawkins que en su libro "*El cuento del antepasado*" nos da una magnífica explicación casi cinematográfica del porqué:

"Cualquier animal que se tenga que desplazar de un punto a otro, en vez de permanecer estático, absorbiendo agua con nutrientes, probablemente necesitará un extremo frontal especializado. Una cabeza. El posible alimento llegaría, para este animal, desde el extremo de la cabeza, por lo que es fácil imaginar que en ella se abriría el orificio para alimentarse, así como los detectores para conseguir más fácilmente el alimento, como pueden ser tentáculos táctiles, órganos olfativos y visuales. A la par, es lógico pensar que la mayor concentración de tejido nervioso se diera cerca de estos órganos sensitivos y cerca del principal centro de acción, el aparato con el que capturaba su alimento.

Así que podemos definir a la cabeza como extremo director, el que tiene la boca, los principales órganos sensoriales y el cerebro, si es que lo tiene. Otro mecanismo con lógica sería el que las sustancias residuales del animal se expulsasen por el extremo contrario al de la boca, para dificultar el reciclado de estos residuos.

Tendríamos pues una especie de gusano primigenio que ha conseguido aprovechar las oportunidades que le da una asimetría delante-detrás, ¿y por qué no también una asimetría arriba-abajo dorsal-ventral?

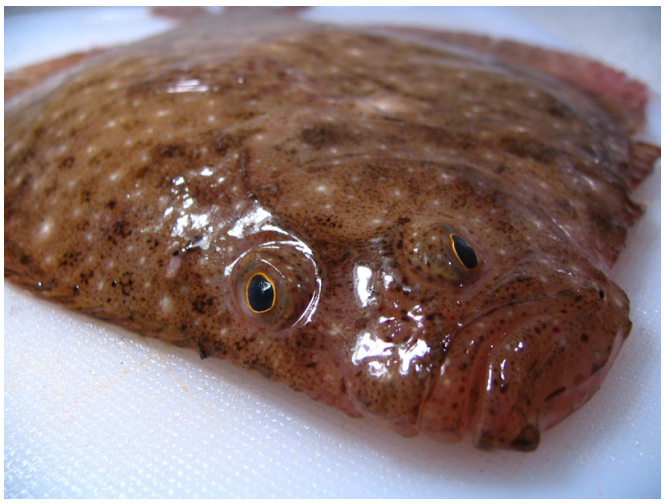
Basándonos en la realidad de la fuerza de la gravedad saltan a la vista las inevitables diferencias que existen entre "arriba" y "abajo". Abajo es donde está el fondo marino, es donde uno se puede apoyar para moverse, arriba es de donde llega la luz solar, de arriba es por donde vienen las cosas que caen sobre uno. Los peligros, por tanto, no son los mismos si vienen de arriba o de abajo.

Así que nuestro primitivo gusano no tuvo más que desarrollar una parte superior, o dorsal, especializada para las amenazas y oportunidades que le venían de arriba, de la parte luminosa, así como una cara inferior, o ventral, también preparada para lo que le venía de abajo, del fondo del mar.

Con estas dos asimetrías, delante-detrás y arriba-abajo, automáticamente quedan definidos ambos lados, izquierdo-derecho. Pero, a diferencia de los otros dos ejes, no hay motivos para diferenciar entre el lado derecho y el izquierdo. El peligro puede venir de la misma manera desde la derecha como por la izquierda. No hay una razón especial que le permita encontrar más comida por un lado que por el otro, aunque sí habría diferencias entre las capas de aguas más superficiales o más profundas".

Es más, añadiremos, no resultaría muy conveniente el tener derecha e izquierda desiguales, ya que supondría un ineficaz sobreesfuerzo de coordinación tanto para alimentarse como para

moverse, o para supervisar el amenazante entorno. Por tanto, parece lógico que cualquier modificación novedosa que hubiera sido buena para el lado derecho lo tenía que ser también para el izquierdo, ¿en razón de qué iba a ser lo contrario?



Detalle de la cabeza del lenguado con los dos ojos en el mismo lado, el izquierdo. Puro arte contemporáneo (Wikimedia, GFDL 1.2)

No obstante, comentaremos aquí como curiosidad el caso del lenguado y el de sus colegas las platijas y los gallos. Después de haber ensalzado las ventajas de la bilateralidad, a este animal habría que calificarlo como un irresponsable, ya que nace con esta simetría y poco a poco adopta un esquema picasiano. A medida que pasan los días se recuesta en el fondo del mar sobre su lado derecho. Como sólo vería con el ojo que queda libre, el izquierdo, su situación sería muy precaria. Así que poco a poco tuerce la boca situándola en posición arriba/abajo, y traslada a su ojo derecho junto al izquierdo, los dos mirando hacia la superficie luminosa. Misteriosamente, su orientación derecha/izquierda pasa a ser una deformada arriba/abajo.

El camino de la segmentación

El concepto de segmentación se refiere a la repetición de unidades anatómicas casi idénticas en los cuerpos de animales y vegetales:

los segmentos. Ya en algunos organismos de los ancestrales platelmintos aparecen rudimentos de esta estructuración, claramente manifestada en los artrópodos, insectos o cordados. Ello nos permite pensar que, si nos remontamos hasta el más antiguo ancestro común de todos ellos, veríamos que debía ya participar de alguna manera de segmentación. La datación basada en los genes nos llevaría a una época en el entorno de hace 630 millones de años.

Este fenómeno permite un alto grado de especialización de las regiones corporales, por lo que los científicos creen que en la segmentación podría estar el origen de la diversidad y de la longevidad de los grupos animales más extendidos del mundo. Resulta mucho más eficiente para un animal el que gestione su actividad por medio de la repetición de bloques corporales especializados, los segmentos, antes que generalizar en todas y cada una de las partes de su organismo cualquier tipo de función.



Scolopendra cingulata mostrando claramente la segmentación de su cuerpo en metámeros (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Se conoce como metámero a cada uno de los segmentos que se repiten en ciertos grupos de animales con simetría bilateral y celoma. Cada metámero tiene cavidades celómicas, que como sabemos aparecen durante la gastrulación del embrión, separadas de las de otros metámeros por tabiques. Los órganos y sistemas

tanto internos como externos de uno de esos animales pueden estar repetidos en cada metámero. Por ejemplo, en los artrópodos cada metámero puede llevar al menos un par de apéndices, que pueden ser patas, antenas o branquias en el caso de los acuáticos.

Los insectos tienen la cabeza formada por seis segmentos, que no son muy evidentes, en el nº 2 salen las antenas, y en los posteriores las mandíbulas y otros adminículos bucales. Les siguen claramente tres segmentos torácicos, cada uno llevando un par de patas y los dos últimos suelen desarrollar un par de alas cada uno. Más allá de los segmentos torácicos aparecen los abdominales, normalmente once. Cada célula de cada segmento "sabe" dónde está y "sabe" lo que tiene que hacer.

La metamerización se da también de modo característico en el filo de los anélidos e incluso en los vertebrados, aunque en este último grupo no es tan evidente porque a lo largo de la evolución del grupo ha habido múltiples modificaciones, fusiones y reducciones de dichos metámeros, perdiéndose parcialmente la apariencia metamérica externa.



Fotografía de un grupo de Equisetum telmateia en la que se puede observar sus tallos segmentados (Wikipedia, CC BY-SA 3.0)

No nos olvidemos de que algo semejante a la segmentación también es una opción que usan las plantas, aunque no parece que sea buscando la eficacia en el reparto orgánico de la especialización, sino como solución en la carrera armamentística por conseguir las alturas y por tanto la luz solar. El crecimiento de las plantas se da en los meristemos, que generan nuevas unidades modulares a medida que la planta crece. Esto permite la repetición estructural que es característica de la forma vegetal. Para ellas la modularización es una buena solución estructural para crecer. Un buen ejemplo lo encontramos en las equisetáceas, ancestrales plantas con un extenso registro fósil del Devónico y Carbonífero.

Volviendo a los animales, es obligado hacerse las siguientes preguntas: ¿Cuándo se produjo el salto hacia la segmentación? ¿Y por qué?

A partir de estudios filogenéticos [1] realizados por investigadores franceses del Centro de Genética Molecular del CNRS y de la Universidad Paris Diderot, se ha demostrado que la segmentación de los embriones de animales tan distintos como una mosca -artrópodo- o un gusano -anélido- la dirigen los mismos tipos de genes, lo que nos ayuda a pensar que esta característica biológica apareció por primera vez en un ancestro común que habría vivido hace unos 600 millones de años.[2]

Llevar a cabo la segmentación durante el crecimiento de un embrión implica una labor de coordinación muy precisa, ya que a lo largo del proceso se va dando una activación progresiva de algunos genes específicos. En alrededor de 48 horas se han de completar el desdoblamiento de las capas repetitivas que acabarán conformando el cuerpo del embrión, comenzando por las más próximas a la cabeza y acabando con las de la cola.

Los seres humanos estamos formados por más de treinta capas paralelas a lo largo del eje que dibuja la columna vertebral, que se corresponden más o menos con el número de vértebras que tenemos. Durante la etapa fetal y en la niñez hay 33 vértebras.

Durante la etapa adulta sólo quedan 24, debido a la soldadura de las que formarán los huesos sacro y cóccix.

Según los datos anteriores, durante el desarrollo embrionario deberán generarse 33 metámeros en dos días. Y así es. Exactamente cada hora y media se genera un nuevo segmento. En este proceso, los genes que se van a expresar en los futuros segmentos se activan con exactitud en el momento preciso, uno detrás de otro, empezando por los de la cabeza y acabando con el último del cóccix. El desarrollo de esta sucesión es un proceso de alta precisión que no admite fallo ni alteración temporal, ya que, si no, los miembros aparecerían en lugares erróneos del cuerpo.

Pero ¿cómo saben los genes que deben actuar de una manera tan sincronizada?

El ADN esconde la respuesta a este mecanismo. De hecho son unos genes muy específicos, los Homeobox -más conocidos como *Hox*-, los implicados en este proceso. Estos genes están situados con exactitud unos detrás de otros en la cadena de ADN, formando en todos los vertebrados tetrápodos, incluido el hombre, cuatro grupos como cuatro convoyes de vagones de tren. En otras especies el número de convoyes varía.

Parece sorprendente la existencia de estas cadenas de genes similares, pero existen evidencias que corroboran la formación de los cuatro complejos de genes Hox en vertebrados a partir de uno único ancestral, probablemente como consecuencia de duplicaciones y posterior divergencia.

Aunque la mecánica del proceso es igual en todos los animales, particularizamos aquí el caso de los humanos. En los primeros momentos del embrión los genes Hox están inactivos, permaneciendo enrollados como un carrete de hilo dentro del ADN. En el momento preciso la cadena de ADN comienza a desplegarse. Cada hora y media actúa enviando instrucciones de forma progresiva a los Hox, consiguiendo así la secuencia adecuada. Los genes que codifican la formación de la zona cervical

se activan los primeros. Lo mismo ocurre más tarde con los genes correspondientes al desarrollo de las vértebras torácicas, lumbares, sacras y coccígeas. El embrión comienza así a formar sus capas.

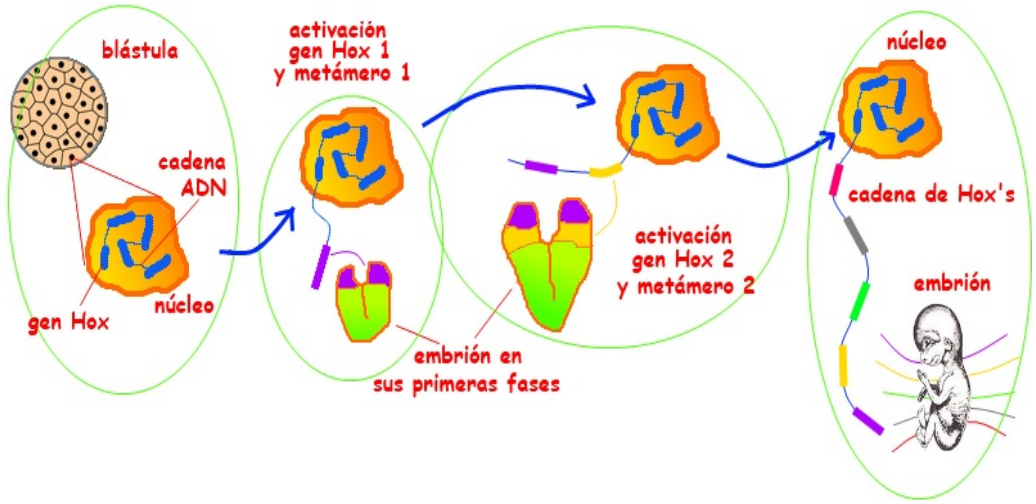


Diagrama del mecanismo de formación embrionaria y la relación de ésta con los genes Hox

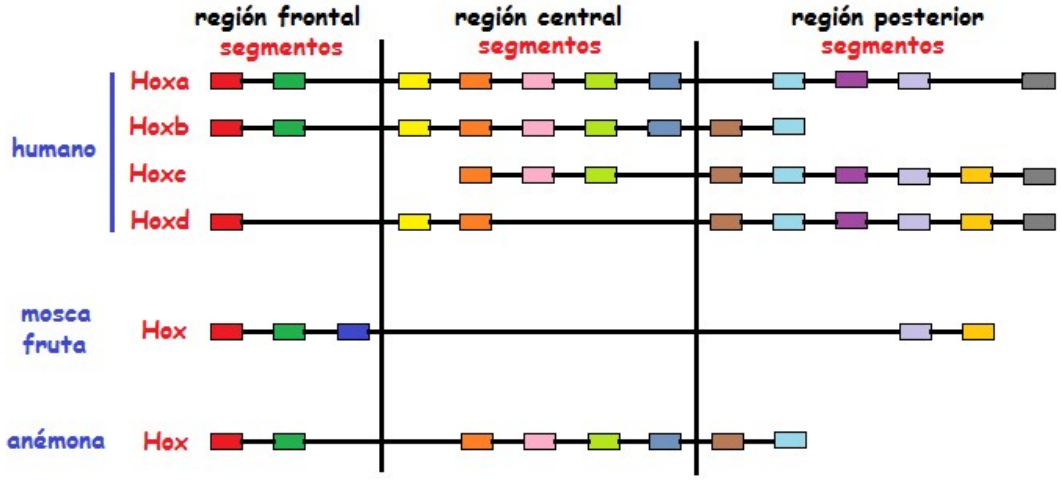
Podría pensarse que cada metámero tiene activado su particular gen Hox y desactivados el resto. Pero esto no puede ser así, pues sólo hay trece tipos de genes Hox y los metámeros son muchos más, hasta 33 o 34. La explicación la encontramos una vez más en los gradientes químicos dentro del embrión. Cada gen Hox se expresa preferentemente en un segmento, pero también se expresa en los segmentos posteriores, cada vez con menos "potencia" y de una forma gradual. Por lo tanto, en cada segmento hay un cóctel diferente de influencias de genes Hox. Simplificando mucho, podemos decir que ésta es la herramienta que utilizan las células para saber en qué segmento se encuentran: "compara" las químicas de su segmento con las del anterior y el posterior.

Una vez que cada célula sabe dónde está, ya sólo tiene que seguir las instrucciones que le dicta el mar de proteínas en donde esta inmersa. Así, un segmento desarrollará el corazón y otro desarrollará la vejiga: partiendo de un mismo patrimonio genético se han activado y desactivado los genes necesarios para una organogénesis diferenciada.[3]

Ya sólo le queda a la selección natural el dirigir los ritmos de crecimiento. Dar órdenes para que se desarrolle más o menos la nariz y será un elefante o un hipopótamo; o que tenga el tórax redondo y será un cangrejo, o que lo tenga alargado y será un langostino. Es cuestión de "simples" crecimientos diferenciales.

No quiero dejar el tema de la metamerización, punto básico de partida en el modelado de los organismos, sin volver a hacer énfasis en lo que me parece el importante mensaje que nos están enviando cada uno de los segmentos de un animal.

Los genes Hox y otros colegas, como las proteínas Noggin o los BMP, modelan la estructura externa e interna de los cuerpos. Pero lo más importante es que estos genes participan en mayor o menor proporción, los mismos genes, en el desarrollo de los embriones de todos los organismos animales, desde una anémona, una mosca de la fruta o un ratón hasta un humano. En cualquier animal, ya sea actual, complejo o primitivo como una esponja, o ya fósil como un trilobites. Variarán en cantidad o proporción, expresando un distinto número de segmentos o diferentes formas corporales en cada uno de ellos. Pero su función e interrelaciones son y fueron siempre las mismas, lo que consolida en gran medida la idea de una unidad de Vida.



Genes Hox y su posición según segmentos y especies

En la gráfica anterior se ha representado la estructura de genes Hox de un humano, una anémona y una mosca de la fruta, dentro del

cromosoma o cromosomas portadores. La anémona tiene Hox en un solo cromosoma. El hombre tiene cuatro juegos –uno en cada uno de cuatro cromosomas distintos- que han aparecido tras una doble duplicación, de uno a dos y posteriormente de dos a cuatro, que se habría producido a lo largo de su cadena evolutiva. De ahí la gran semejanza entre el tipo de sus Hox con los de la anémona, por ejemplo. Cada rectángulo de color representa un gen Hox que expresa proteínas en un segmento determinado de sus cuerpos, siendo el código de colores válido e idéntico para los tres animales.

La importancia de estos genes en la evolución es clara. Pudieron ser decisivos como promotores del nacimiento de una nueva especie. Basta que mute uno de ellos, basta que se mueva de lugar en el cromosoma que los lleva, para que exprese en un segmento un tipo de proteínas diferentes a las que expresaba en el mismo segmento antes de la mutación. Un solo cambio en un Hox podría generar una nueva morfología animal, que si fuera favorable en el nicho ecológico de partida, a la larga podría desarrollar una generación de descendientes formando una nueva especie. Este es un argumento favorable a la tesis comentada de evolución de especies por equilibrio puntuado: la nueva especie puede aparecer casi de repente, por mutación puntual y rápida de un gen Hox, y no acontecer otra especiación en mucho tiempo, a escala geológica, hasta que el azar aporte un nuevo cambio en el mismo u otro Hox, cosa escasamente probable pero posible.

A partir del próximo capítulo comenzaremos una serie de ellos hablando de cómo se consiguieron desarrollar los principales órganos de estos animales.

NOTAS DEL CAPÍTULO 24:

1. Esotos son dos de los estudios mencionados: uno de la Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, "*From whales to earthworms, the mechanism that gives shape to life*" (2011), de News Mediacom y otro, "*The Dynamic Architecture of Hox Gene Clusters*", Daan Noordeermeer et al. (2011), publicado en la revista Science.
2. Podemos obtener más información en una publicación de la revista Science, "*Hedgehog Signaling Regulates Segment Formation in the Annelid Platynereis*", Nicolas Dray et al., de julio de 2010.
3. La **organogénesis** es el conjunto de cambios que permiten que las capas embrionarias (ectodermo, mesodermo y endodermo) se transformen en los diferentes órganos que conforman un organismo.

25. Evolución de la notocorda y el sistema nervioso

En los capítulos anteriores hemos caminado a lo largo de los diversos pasos que llevó a los animales hasta la variada complejidad de sus fenotipos. A partir de éste desarrollaremos en sucesivos capítulos la evolución de los principales sistemas, aparatos u órganos de sus cuerpos. Recuerdo que no voy a seguir fielmente el devenir cronológico de los hechos, sino que me centraré en cómo evolucionó un aspecto concreto, independientemente de en qué periodo temporal se desarrollaron los acontecimientos.

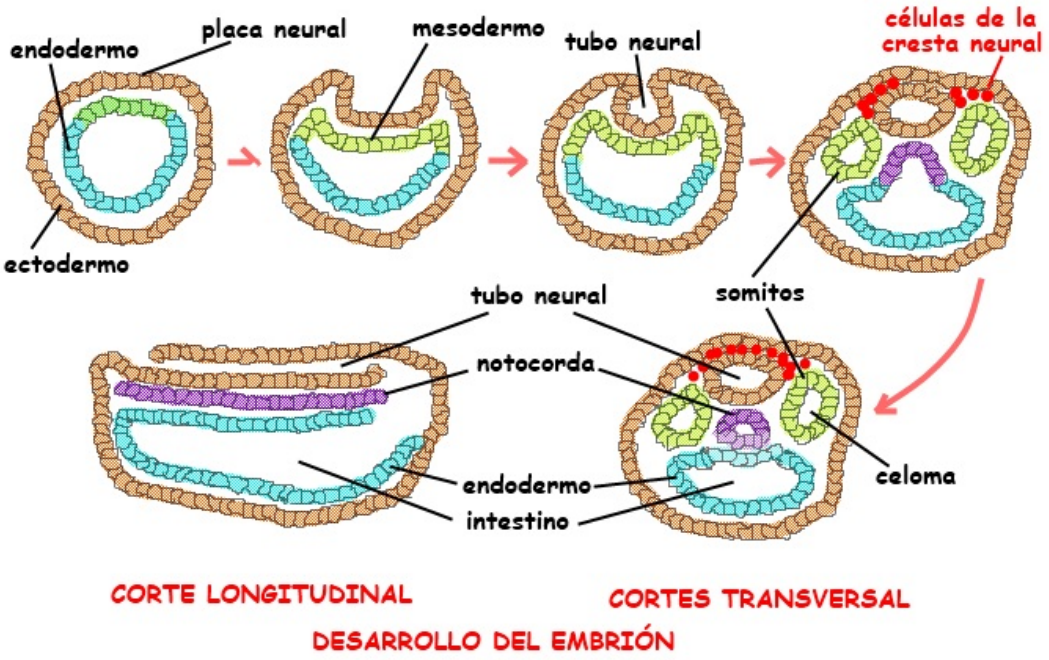
Evolución de la notocorda y del sistema nervioso

Comenzamos con la aparición de la notocorda, ya que con ella se abrió el complejo y variado mundo de los vertebrados.

La notocorda o cuerda dorsal es un cuerpo flexible con forma de vara que se encuentra en todos los embriones de todos los cordados y que corre a lo largo de su eje longitudinal. Se compone de células derivadas del mesodermo, de las que definen su eje primitivo de simetría. En los cordados inferiores persiste durante toda la vida como el principal apoyo axial del cuerpo, mientras que en los vertebrados es la columna vertebral la que toma su lugar.

¿Cómo se desarrolla orgánicamente la notocorda?

Todo se inicia durante la fase embrionaria, en el momento ya conocido en que el mesodermo, órgano precursor del esqueleto y del sistema muscular, iba creciendo y emigrando a lo largo de la línea central primitiva, como ya se comentó al hablar de la diferenciación celular.



El camino del sistema nervioso

Durante este proceso el mesodermo va generando unas células nuevas -ver figura anterior- que ocuparán también la posición del eje antero/posterior, y que poco a poco van invaginando y creando un cordón que será la *notocorda*, futuro eje vertebral de sostén del organismo. En el capítulo 19, "*Los filos del Cámbrico*", ya comentamos su probable procedencia evolutiva a partir de tejido muscular. Mientras, por encima de ella, quizás por el estímulo solar que llega desde el cénit, se produce un engrosamiento longitudinal del ectodermo que va a formar la *placa neural* en un movimiento progresivo de crecimiento hacia el polo anterior del embrión. Está demostrado que la aparición de las células "nerviosas" de la placa neural se produce como consecuencia de una inducción química llevada a cabo por las células de la notocorda que se encuentra inmediatamente debajo de ella. Esto significa que es el futuro tejido muscular y óseo quien induce la formación de tejido nervioso. Es curioso que el sistema encargado de nuestra motricidad siguiendo las órdenes del sistema nervioso sea el que a nivel embrionario induce y sustenta al propio sistema neuronal. Sin mesodermo no sería posible la formación de un sistema nervioso desarrollado.

Acompañando al desarrollo de la notocorda sobre el mesodermo, en el ectodermo la placa neural hace un movimiento semejante, llevando a cabo una invaginación superior que creará el *tubo neural* precursor del sistema nervioso.

¿**Cómo se desarrolla fisiológicamente el sistema nervioso**?

Seguir sus pasos durante el desarrollo embrionario nos puede dar una idea de cuales pudieron ser las fases de su avance evolutivo.

Mientras se va formando el tubo neural, las células del ectodermo que se ubican como un límite entre la parte neural y la no-neural se separarán de ésta para constituir una estructura alargada, a cada lado del tubo neural y por debajo del ectodermo: *la cresta neural*. Sus células son multipotentes, es decir, son capaces de especializarse y desarrollar diversas y distintas funciones. Desde hueso, piel y tendones, hasta neuronas. Una vez más observamos cómo las células del sistema nervioso proceden de tejidos que no tienen nada que ver con la función neuronal.

Tanto de la cresta neural como del tubo neural se formarán las diversas estructuras del sistema nervioso central y periférico. Después de formarse el tubo neural, se suceden en él una serie de transformaciones en su longitud, en su diámetro y en el grosor de sus paredes. Estos cambios no son homogéneos, ya que en diferentes regiones del tubo presentan distinta magnitud, lo que dará pie a la formación diferenciada del sistema nervioso, desde el encéfalo hasta cualquier nervio.

El mesodermo, por su lado y siguiendo el esquema que parece paralelo al del ectodermo, genera unas masas celulares, segmentadas, los *somitos*, al lado de la notocorda, que serán las precursoras de parte del esqueleto y de la musculatura.

Ya está la "semilla" conformada para iniciar el camino de construcción del sistema nervioso desde el tubo neural, del esqueleto y músculos a partir de los somitos y del resto de órganos

que modelará el endodermo. Lo que nos da pie ahora para analizar su proceso evolutivo.

Estudios [1] sobre el anélido *Platynereis dumerilii*, considerado un fósil viviente que apareció hace 600 millones de años, han mostrado que este gusano tiene idéntica maquinaria molecular que la que permite en animales más desarrollados la creación del córtex, la parte más externa y evolutivamente más moderna del encéfalo, que alcanzará su máximo desarrollo en los humanos. Además, este gusano parece que tiene unas proteínas similares a las del actual gusano bellota, *Saccoglossus kowalevskii*, que vive en la arena del fondo marino y que tiene un sistema nervioso muy simple. Estos últimos animales están muy alejados evolutivamente de los invertebrados (de hecho pertenecen a otro filo, los hemicordados) pero tienen unas estructuras branquiales similares a las de los tiburones y anfioxos. Todas ellas son características que relacionan al *Platynereis* tanto con los invertebrados con notocorda como con los vertebrados. Se ha investigado en su desarrollo embrionario para ver cómo actúan tres proteínas concretas en la zona de su cuerpo equivalente a lo que sería el cerebro del embrión de los vertebrados, que finalmente en estos dará lugar al encéfalo. Estas investigaciones han demostrado que estas proteínas interaccionan entre ellas de la misma manera que lo hacen en los vertebrados. En los embriones señalan dónde se debe formar el órgano cerebral. Los vertebrados desarrollarán un cerebro completo, mientras que en el gusano solamente se forma una "piel cerebral".

Estas similitudes entre animales de hace millones de años, gusanos y vertebrados, no pueden ser una coincidencia e indican que el sistema nervioso probablemente evolucionó tiempo atrás en el antepasado común a todos ellos, hace unos 590 millones de años. Quizás los primeros cerebros datan de los primeros gusanos platelmintos, que puede que los usaran para navegar por los fondos de los mares primordiales en busca de comida.

En efecto, parece ser una opinión generalizada que el sistema nervioso, y en particular el encéfalo, sea una respuesta adaptativa de los organismos que necesitan moverse para alimentarse y escapar de los predadores. Las plantas, aunque son seres vivos, no han desarrollado este órgano. Por otro lado es interesante remarcar que la complejidad del sistema nervioso es proporcional a la complejidad en la búsqueda de alimento. En los rumiantes que se alimentan ramoneando tranquilamente la hierba, la corteza cerebral es más simple que la de los carnívoros que necesitan capturar a sus presas tras un acecho, plantear la estrategia de caza y disponer de agilidad de movimientos para conseguirlas.

A este respecto es muy significativo lo que les pasa a los tunicados. En estado larval son animales que se mueven nadando en el agua del mar. Pero cuando les llega el momento de ser adultos se anclan en el fondo permaneciendo estáticos para siempre. Las larvas presentan notocorda y sistema nervioso. En el momento que se fijan al suelo su propio organismo reabsorbe el incipiente sistema nervioso larval ya que no precisa de él. Asombroso.

Y así veremos como cronológicamente a medida que los organismos se complican y sus necesidades motrices son mayores, el sistema nervioso va cogiendo estructura. Observamos que los animales pluricelulares más primitivos no poseen sistema nervioso, aunque sí presentan un rasgo funcional próximo al par estímulo-respuesta. Tienen su cuerpo rodeado por una capa de células epiteliales que son capaces de interactuar con el medio que les rodea: se comportan como órganos excitables que perciben estímulos ambientales.

Por efecto de presiones evolutivas algunas células de ese epitelio ectodérmico comenzaron a desarrollar características funcionales que podríamos llamar “neuronales”, de forma que fueron capaces de reaccionar de forma especial frente a estímulos externos. Las nuevas aptitudes hicieron que algunas de estas células se modificaran integrando funciones propias de las neuronas, desarrollando habilidades especializadas que les permitían

reaccionar con eficiencia frente a los estímulos para después generar un tipo de respuesta rápida que se propagaba a otras células del organismo. Esta destreza primitiva aún la encontramos en animales actuales, desde la medusa hasta embriones de anfibios.

Y quizás esta habilidad explique el hecho mencionado más arriba de que el sistema nervioso de los animales más complejos, al observar su desarrollo embrionario, provenga del mismo tejido ectodérmico que va a desarrollar el epitelio exterior del animal: células sensoriales de la piel se han ido transformado, a lo largo del largo camino de la evolución, en otras más complejas -las neuronas- que han heredado la función primaria.



Cronología del desarrollo del sistema nervioso. La datación corresponde al momento en que se independizó la correspondiente especie del árbol filogenético general (Imágenes de wikimedia)

Demos un paso más que nos lleve a los cnidario (es decir, medusas y pólipos, hidras y corales). En estos animales aparecen las primeras estructuras celulares a las que podemos llamar propiamente *sistemas nerviosos*: están organizadas en forma de red y constituyen un sistema nervioso reticular. Las neuronas tienden a acumularse formando pequeños ganglios que se comunican entre sí mediante haces nerviosos. A pesar de ello este tipo de animales aún carecen de coordinación entre las distintas partes de su cuerpo que sólo reaccionan a estímulos locales. Sus nervios todavía no están recubiertos de mielina.

Un nuevo avance. Los erizos y estrellas de mar sí disponen ya de un sistema nervioso autónomo formado por un anillo circular con extensiones hacia sus segmentaciones radiales. Mediante esta

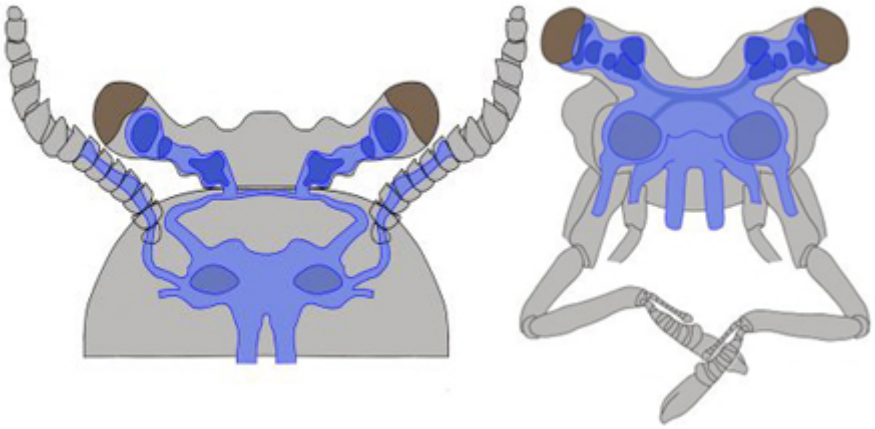
estructura neuronal los ganglios quedan perfectamente interrelacionados. Ello permite una coordinación unificada en todo el cuerpo de la respuesta a los estímulos recibidos.

En el capítulo sobre el Cámbrico habíamos hablado de *Haikouella* una especie de pez sin aletas de hace unos 530 millones de años. Es seguro que dominaba la natación batiendo su cuerpo a un lado y otro gracias a haces de músculos que se apoyaban en una cuerda semirrígida que iba de la cabeza a su cola. Posiblemente debió ser el primer vestigio de una notocorda acompañada de un tubo neural. Seguramente sería un animal segmentado, ya que poseía estructuras orgánicas diferenciadas, como branquias, músculos o corazón.

En estos animales segmentados, que como ya sabemos crecen por metamerización de sus cuerpos, la red neuronal tiene un centro en cada segmento formado por un par de ganglios interconectados entre sí, y que forman además un par de cadenas longitudinales al estar unidos los de un segmento con los de sus adyacentes. En los segmentos más próximos al polo anterior del animal, en donde la evolución va concentrando importantes detectores sensoriales -vista, olfato, gusto, antenas táctiles-, los ganglios se ordenan formando cerebros primitivos lo que les permitía realizar funciones de aprendizaje y de una posterior respuesta variada a los estímulos recibidos. Esta disposición la podemos ver en algunas lombrices y en los artrópodos.

En 2012 se reportó [2] el descubrimiento en la provincia china de Yunnan del fósil de un artrópodo del Cámbrico, datado en 520 millones de años, con un diseño corporal muy sencillo, al que se ha denominado *Fuxianhuia protensa*. En este fósil se conservan estructuras correspondientes al cerebro del animal, el cual es tan sofisticado como el de los modernos artrópodos, lo que situaría la aparición de cerebros complejos en una época anterior a la que hasta ahora se había asumido. En la imagen siguiente se ha dibujado una reconstrucción del cerebro de *Fuxianhuia protensa* (a la izquierda), que como se puede observar presenta una similitud

con el cerebro complejo del cangrejo ermitaño *Coenobita clypeatus*, un artrópodo moderno (a la derecha).



(Fuente de la ilustración: Nicholas Strausfeld, Nature 2012, ver nota 2 a final de capítulo, fair use)

Avanzado el proceso evolutivo, en los vertebrados los ganglios cerebrales primitivos van a experimentar un gran desarrollo, tomando la dirección de las funciones del sistema nervioso, frente a los otros ganglios más distales. Se trata del proceso de encefalización, por el que se van incrementando las capacidades del órgano director de cualquier organismo animal complejo, resultado de una coevolución entre las habilidades del animal y la creciente capacidad de su masa neuronal. El encéfalo constituye la parte más masiva del sistema nervioso, siendo la relación entre su tamaño y el del cuerpo que lo posee un indicador de la inteligencia de un organismo. En los primeros pasos evolutivos dirigirá las funciones vitales más elementales quedando el vestigio de aquella época en el bulbo raquídeo de los encéfalos modernos más desarrollados. Este estadio cerebral se le conoce como reptiliano. Progresivamente se van a añadir nuevas estructuras neuronales de tipo ganglionar o cortical, con las que se llegará a gestionar al organismo y su relación con el exterior vía las emociones. A este nuevo estadio más desarrollado se le conoce como sistema límbico. Más tarde irá aumentando el tamaño relativo de los hemisferios cerebrales principalmente en la corteza exterior, gracias a una mutación genética que indujo un crecimiento diferenciado -heterócrono- en distintas partes de

aquellos. En este proceso un área específica va tomando el control general, que culminará en el desarrollado córtex frontal de los humanos, verdadero centro de control de las capacidades de razonamiento superiores.

Con esto concluimos el breve paseo por el campo evolutivo de los órganos que dirigen nuestra vitalidad, sus funciones metabólicas, la coordinación mecánica, la percepción de nuestro entorno, la base de la experiencia, las reacciones emocionales y, en el caso de los hombres, la capacidad de proyectar el futuro. En el siguiente capítulo analizaremos el camino evolutivo de algunos de los más importantes órganos y aparatos que precisamos para nuestra subsistencia: el sistema óseo y muscular para moverse, depredar y no ser depredado, y los aparatos digestivo, respiratorio y circulatorio necesarios para alimentarse, metabolizar y expulsar los residuos perniciosos generados durante el proceso.

NOTAS DEL CAPÍTULO 25:

1. "*Marine worm rewrites theory of brain evolution*", Amy Maxmen, (marzo 2012), publicado en la revista Nature de marzo de 2012.
2. En ésta publicación, "*Complex brain and optic lobes in an early Cambrian arthropod*", Xiaoya Ma et al., de la revista Nature de octubre de 2012 podemos leer acerca de los detalles.

26. Evolución de herramientas de sostén y alimentación

En el último capítulo hemos estado profundizando en el camino evolutivo del sistema nervioso. Hoy continuaremos la saga dando por sabido al ente director y coordinador para centrarnos en algunos de los "trabajadores" de los organismos: nos sujetamos gracias a los huesos y músculos, nos alimentamos mediante el digestivo y con la ayuda del respiratorio y circulatorio. Ésta es su historia.

Pero antes de entrar en materia, recuerdo que en éste capítulo, al igual que en los anteriores, no estoy siguiendo estrictamente el devenir cronológico de los acontecimientos, sino que me centro en cómo evolucionaron estos órganos concretos, independientemente de en qué periodo temporal se desarrollaron los hechos.

Evolución del sistema óseo

A lo largo de los siguientes párrafos vamos a analizar el sistema óseo propio de los vertebrados, sin hacer mención a otros adminículos de sujeción y soporte pertenecientes a otros animales, como pueden ser las espículas de las esponjas, los caparazones de los artrópodos o los osículos de los equinodermos.

La evolución del sistema óseo transcurre paralela a la aparición y evolución del sistema nervioso o del aparato muscular. Es fácil de entender, ya que es imposible imaginar que hayan evolucionado por separado. Por ejemplo, los pares de ganglios del tronco encefálico relacionados con la vista, el olfato y el oído aparecieron como consecuencia de que añadieron un plus de utilidad y eficacia en la supervivencia, y fueron por tanto preservados por la selección natural. Sin embargo, esta utilidad y eficacia no servirían para nada si no tuvieran un propósito: eran útiles para orientarse y

desplazarse por el medio, lo que nos lleva a que debieron coevolucionar con los músculos y estructuras óseas de soporte, una columna vertebral o unas extremidades. Como también sería ilógico pensar que estos ganglios hubieran aparecido independientemente de los correspondientes órganos sensoriales. Y a su vez, no se hubieran podido manifestar a no ser que les hubiera acompañado en su camino un soporte rígido craneal, con orificios por donde el sistema nervioso pudiera acceder a la información exterior. Fue un proceso evolutivo cooperante, no estrictamente a golpe de "decreto ley", sino más bien cada uno a su ritmo, siguiendo las pequeñas ventajas que poco a poco iban apareciendo.

Aunque el uso de minerales como elementos de sostén y protección es muy antiguo, posiblemente del Neoproterozoico, es durante el Cámbrico cuando la biomineralización del CO_3Ca se usa como un elemento diferenciador, al emplearse de forma intensa y variada para crear elementos de soporte estructural.

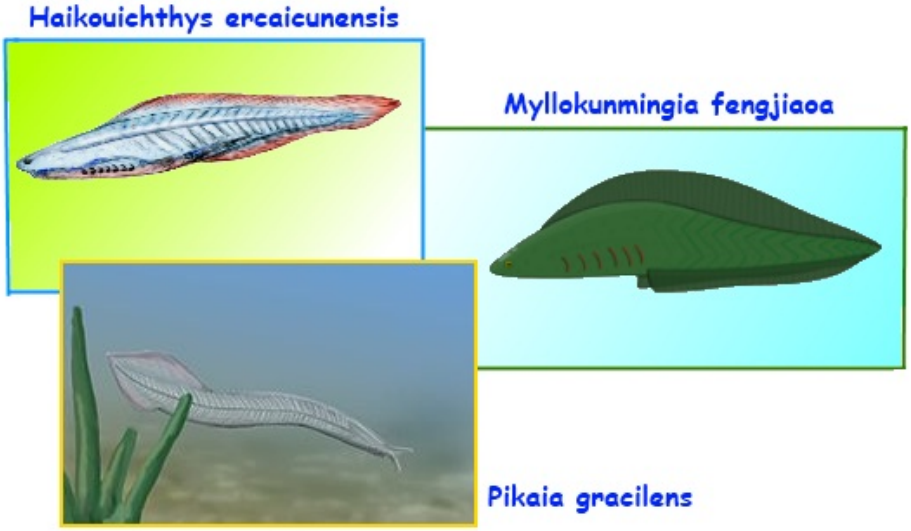
En los fósiles marinos de *Pikaia gracilens, Haikouichthys ercaicunensis* y *Myllokunmingia fengjiaoa*, así como en los fósiles de los peces marinos *Pteraspidomorphi* encontramos los ancestros más antiguos de los actuales vertebrados, y por tanto el origen del sistema óseo actual. Algunos de ellos ya son viejos conocidos.

Pikaia gracilens (510 millones de años) fue clasificado inicialmente como un gusano poliqueto, por su segmentación regular corporal, aunque en 1979 fue incluido dentro de los cordados, convirtiéndose en uno de los más antiguos ancestros conocidos de los vertebrados modernos, ya que posee una columna vertebral primitiva de composición ***cartilaginosa***, *sin vestigios de cráneo* y con médula espinal interna.

Haikouichthys ercaicunensis es un vertebrado de hace 530 millones de años, con apariencia de pez, que se caracteriza por poseer una banda ondulante única que recorre longitudinalmente tanto el flanco dorsal como el ventral. La orientación radial de la estructura de la aleta dorsal se asemejaba a la de peces muy

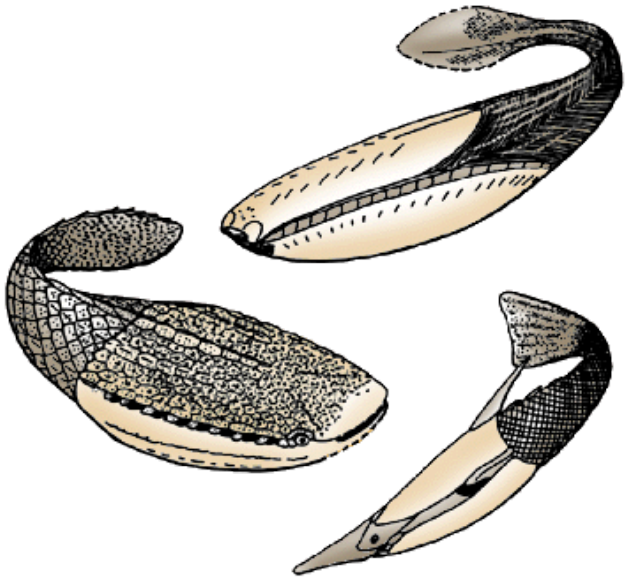
primitivos. Esta característica le coloca como uno de los más antiguos cordados. *Tenía cabeza* y tronco diferenciados. La cabeza tenía entre seis y nueve segmentos regulares, mientras que el tronco estaba compuesto por otro tipo de segmentos en forma de "V".

Myllokunmingia fengjiao vivió en el bajo Cámbrico, hace unos 525 millones de años. Disponía de seis segmentos craneales diferenciados de los veinticinco, también en forma de "V", del tronco. Todos los segmentos eran cartilaginosos, sin que existan indicios de mineralización de los elementos de su esqueleto. Sobre el tronco aparece una aleta dorsal en forma de vela y por debajo una aleta ventral, posiblemente doble, y sin estructuras parecidas a radios.



(Imágenes de Wikimedia, CC BY-SA 3.0, dominio público, GFDL 1.2)

Desde los anteriores fósiles marinos hasta la aparición de los primeros fósiles de peces sin mandíbulas (pteraspidomorfos) transcurrieron unos 50 millones de años, adentrándonos en el periodo Ordovícico que se inició hace 488 millones de años. Con ellos aparece el ***primer escudo óseo verdadero***, que cubría la cabeza. Tenían una única aleta caudal. Analizando en sus fósiles la cara interior de las placas craneales protectoras, se han observado improntas de las agallas, cerebro y cápsulas nasales.



Ejemplares de pteraspidomorfos (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Más adelante en la serie seguiremos la pista de la evolución del esqueleto como estructura, de cartilaginosa a ósea, desde los peces a los mamíferos.

Evolución del sistema muscular

La mayoría de los animales multicelulares poseen unos órganos de tejido contráctil, encargados principalmente del movimiento. Las células que forman el tejido muscular se agrupan en haces distribuidos de diversas maneras por el cuerpo de los animales.

Siguiendo el camino evolutivo de los animales que poseen este tipo de estructuras nos podemos hacer una idea aproximada de la cronología de su evolución, que queda reflejada en la figura de más abajo. Veremos cómo se pasará de una disposición de simple malla contráctil a una progresiva independencia e individualización del tejido muscular y a la colaboración con los tejidos de sostén.

Los animales *diblásticos* (anémonas, medusas…) tienen los ***haces dispersos bajo el tejido exterior***, a modo de red, por lo que pueden contraer de este modo la entrada y salida del agua a través del blastóporo. Las medusas utilizan la salida de agua para impulsar el desplazamiento.

En los animales *triblásticos acelomados* (platelmintos, nemátodos, nemértinos y rotíferos) y en los moluscos, los haces musculares forman una capa continua unida al tejido de recubrimiento externo, formando un ***saco músculo-cutáneo***. Se mueven por la contracción de este saco, que deforma el cuerpo en diversas direcciones. Los cefalópodos utilizan esta contracción del saco muscular para expulsar agua del cuerpo y, como las medusas, desplazarse por la fuerza de la reacción.



Posible evolución cronológica del sistema muscular. Las fechas corresponden al inicio de la radiación del filo (Imágenes de wikimedia)

Los animales *triblásticos celomados* con cuerpo segmentado (anélidos, artrópodos y vertebrados) tienen los haces musculares formando unos *órganos que se repiten por cada metámero, son* ***músculos segmentarios***. Los anélidos poseen también sacos musculares además de músculos segmentarios. Se mueven mediante una serie de contracciones y extensiones que le permiten desplazarse arrastrándose por el suelo.

En los *artrópodos y vertebrados* los músculos segmentarios tienen una ***forma definida y son independientes unos de otros***. Los artrópodos poseen músculos insertos por medio de tendones en la parte interna de las piezas del caparazón externo de quitina. Contrayéndolos, permite que el animal se mueva, pues el caparazón está debidamente articulado. Igualmente ocurre con las patas, con las que realizan los movimientos de traslación.

En los vertebrados también *los músculos se insertan por* ***tendones*** a los huesos del esqueleto. Con su contracción levantan las piezas esqueléticas, permitiendo a las diversas partes del cuerpo moverse. Mediante un juego de músculos antagónicos se consiguen movimientos opuestos sobre una misma articulación: cuando uno de ellos se contrae el otro se relaja. Estos músculos son particularmente importantes en las extremidades que realizan un movimiento activo.

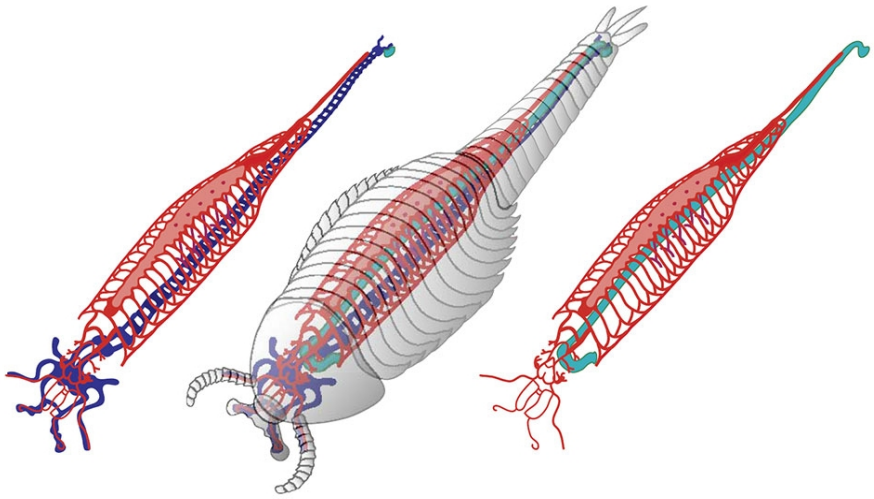
Evolución del sistema circulatorio

El sistema circulatorio es el aparato logístico de los organismos: transporta los nutrientes y oxígeno hasta las células y a los residuos hasta los puntos de eliminación. Al igual que hicimos con el tejido muscular, la siguiente relación por orden evolutivo nos da una idea de cómo se fue sofisticando el sistema circulatorio a lo largo del tiempo. Veremos cómo se inicia con unos elementales conductos para la distribución del alimento, para irse complicando con la aparición de un elemento impulsor del líquido que soporta el transporte.

En las *esponjas* y en la mayoría de los *celentéreos* no existe un sistema circulatorio propiamente dicho. La difusión de los nutrientes tiene lugar de una célula a otra sin grandes problemas. Únicamente en algunos de ellos la ***cavidad gastrovascular presenta ramificaciones*** para facilitar la distribución de los nutrientes a todas las células del organismo, lo que constituye un muy rudimentario sistema circulatorio. Pudo iniciarse en la frontera del Proterozoico-Fanerozoico, en el entorno de los 580 millones de años.

La mayoría de los *invertebrados* poseen un sistema circulatorio abierto, en el que la hemolinfa, el líquido equivalente a la sangre, circula a través de un ***sistema de canales o senos***. Muchos invertebrados poseen además ***estructuras pulsátiles*** para dirigir la circulación de la hemolinfa. En algunos grupos, estas estructuras de bombeo no son más que simples vasos con cierta capacidad

contráctil, pero también existen otros grupos que poseen órganos más especializados y complejos. Podemos datarlo como una modificación del Cámbrico temprano, hace unos 540 millones de años. De hecho se ha descubierto[1] en un yacimiento chino lo que resulta ser el primer indicio fósil de un corazón, con forma tubular y vasos sanguíneos, que corresponde a *Fuxianhuia protensa,* un artrópodo de hace 520 millones de años.



Reconstrucción de Fuxianhuia protensa, de hace 520 millones de años, con el sistema cardiovascular en rojo, el aparato digestivo en verde y el sistema nervioso central en azul (imagen: Xiaoya Ma et al., Nature, ver nota 1 a final de capítulo, fair use)

Los *vertebrados* y algunos grupos de invertebrados poseen *sistemas circulatorios cerrados* con auténticos vasos. Los sistemas circulatorios cerrados presentan siempre *un órgano impulsor* de sangre bien diferenciado. Los primeros fósiles conocidos de animales vertebrados que tendrían este tipo de sistema circulatorio serían los ostracodermos, en la frontera Cámbrico-Ordovícico, hace 490 millones de años.

En los peces el corazón tiene sólo dos cámaras, consecutivas, una aurícula y un ventrículo, por lo que la sangre arterial y la venosa no circulaban aún separadas. La evolución cardíaca lleva al siguiente modelo con dos aurículas y un ventrículo en los anfibios y reptiles. Finalmente aparece al corazón de cuatro cámaras en aves y mamíferos.



Evolución del sistema circulatorio. La datación corresponde a la fecha estimada de radiación del correspondiente filo. (Imágenes de wikimedia)

Evolución del aparato respiratorio

Los órganos respiratorios, frontera entre el oxígeno exterior e interior del organismo, no se encuentran en todos los animales. Los animales muy primitivos, al ser relativamente pequeños y con sus células en contacto con el agua –en donde está disuelto el oxígeno- o muy próximas a este medio, obtenían este gas por ***difusión*** a través de su tegumento externo y de allí al resto de células, todas muy cercanas. Este tipo de respiración cutánea es la que practican los animales más sencillos y de pequeño tamaño, como las esponjas, medusas, pólipos… Algunos animales también la

realizan como complemento de los sistemas respiratorios propiamente dichos.

Hace 525 millones de años, al inicio del Cámbrico, como ya comentamos al hablar del *Myllokunmingia fengjiaoa* y su notocorda, aparecen ya animales con arcos branquiales. A partir de ellos se desarrollaron las ***branquias***, órganos especializados en el intercambio de oxígeno, que se constituyeron como la principal opción para una gran mayoría de los animales acuáticos como artrópodos, peces o las larvas de los anfibios.



Evolución de los aparatos respiradores. La datación corresponde a la fecha estimada de radiación del correspondiente filo (Imágenes de wikimedia)

Con el inicio del asalto de la tierra por parte de los artrópodos marinos, estos tuvieron que cambiar su metodología de respiración desarrollando con el tiempo un ***sistema tubular traqueal***, por el que el aire llegaba directamente hasta cerca de los tejidos internos y difundiéndose el oxígeno casi en el mismo lugar que se necesitaba. Fue la solución alcanzada por los *insectos*, *miriápodos* y *quelicerados*, entre otros. Debió suceder hace alrededor de 480 millones de años.

El segundo asalto de la tierra por los animales marinos fue el que realizaron los *tetrápodos*, descendientes directos de los peces. En estos últimos se había empezado a especializar un tipo de saco desarrollado en la parte inferior de su faringe, que poco a poco fue cargándose de vasos sanguíneos y tomando funciones respiratorias. Con la salida a tierra fueron evolucionando paulatinamente hacia verdaderos ***pulmones***. Esto debió iniciarse ya en el Devónico, en

cuyo capítulo hablaremos del famoso *Tiktaalit*, medio pez, medio tetrápodo, hace más o menos 380 millones de años.

Evolución del aparato digestivo

El aparato digestivo es la gran caldera de la alquimia, en donde se procesan los alimentos para extraer los nutrientes de tal manera que puedan ser utilizados por las células.

Los primitivos *protozoos* se alimentaban por **fagocitosis** o bien **absorbiendo** los nutrientes a través de sus membranas celulares, para después digerirlos en el propio citoplasma con la ayuda de unos corpúsculos llamados lisosomas. Así debió ser la función digestiva para todos los animales anteriores a los *metazoos*, que como sabemos eran los animales eucariotas pluricelulares.

Posiblemente los *animales ediacáricos*, habitantes del más inicial mundo metazoo, tendrían mecanismos de alimentación semejantes. Sus estructuras planas y la falta de evidencias de boca e intestinos, así como de alguna prueba de su estructura interna, hacen difícil el imaginarlos según los parámetros actuales. La hipótesis más aceptada es que podían succionar los nutrientes del agua a su alrededor por ***ósmosis***. Se trata de soluciones aplicadas hace 600 millones de años.

Poco antes del Cámbrico y a lo largo de este periodo aparecen nuevas alternativas. Han transcurrido quizás 40 o 50 millones de años desde Ediacara. En las *esponjas* encontramos una especie de pared gástrica recubierta por un tapiz unicelular de coanocitos. No es que se pueda considerar como un auténtico tubo digestivo, ya que este tipo de células nutritivo-musculares son las encargadas de captar allí los nutrientes por fagocitosis, posterior digestión y transporte al resto de células. Sus compañeros en el tiempo y la evolución, los *celentéreos* -medusas y pólipos- y los *platelmintos,* que practican un sistema semejante, tienen cavidades y tractos digestivos, con una única abertura exterior, en donde se produce una predigestión, encargándose de completar el ciclo las mencionadas células especializadas. El alimento se transporta

mediante cilios, se absorbe en las paredes internas y la ***digestión es intracelular***. Los residuos son expulsados por el mismo orificio.

A medida que aumentaba la complejidad de los animales la digestión intracelular iba siendo desplazada por la ***digestión extracelular***, aunque en algunos metazoos aún no aparece un tubo digestivo específico.



Evolución del aparato digestivo (Imágenes de wikimedia)

En la mayoría de los *invertebrados* el ***tubo digestivo*** ya tiene por lo general boca y ano, recubierto de un epitelio en el que se distinguen células secretoras y absorbentes, con funciones diferenciadas según el tramo y según los filos: la parte anterior es en la que se localizan los órganos masticadores, una parte intermedia de variada morfología, aunque aún no muy diferenciada de un ensanchamiento intestinal, en donde tiene lugar la digestión, y un intestino posterior en donde se realiza la absorción de los nutrientes. Todo esto sucedía durante el Cámbrico, en el entorno de hace 540 a 490 millones de años.

En los *vertebrados* los criterios de diseño no varían demasiado, ya que también se puede diferenciar un tubo digestivo anterior, con un

estómago ya muy desarrollado, y otro posterior donde se absorben los nutrientes. A lo largo de ambos aparecen nuevas ***glándulas***, como las salivares, hígado o páncreas. Según la clase taxonómica aparecen adminículos particulares: las branquias en los peces, la cloaca en los anfibios, la molleja en las aves o el especial aparejo estomacal de los mamíferos rumiantes. Las anteriores modificaciones se produjeron a lo largo de la historia evolutiva de los últimos 450 millones de años.

Hecho ya un rápido repaso sobre la evolución de los principales aparatos y sistemas de los metazoos, dedicaremos un nuevo capítulo, y con ello acabaremos este monográfico específico, a describir la evolución de uno de los órganos principales y más estudiados por su importancia evolutiva: el sensor óptico, el ojo, que conecta a los animales con su exterior.

NOTAS DEL CAPÍTULO 26:

1. Podéis acceder a más información sobre este hallazgo acudiendo a la publicación "*An exceptionally preserved arthropod cardiovascular system from the early Cambrian*", Xiaoya Ma et al., aparecida en la revista Nature de abril de 2014.

27. Evolución del ojo

Con este capítulo finalizamos el breve conjunto de tres en los que hemos desarrollado un tema específico: la evolución de los principales sistemas, órganos y aparatos que utilizan los seres del Reino Animalia para su supervivencia.

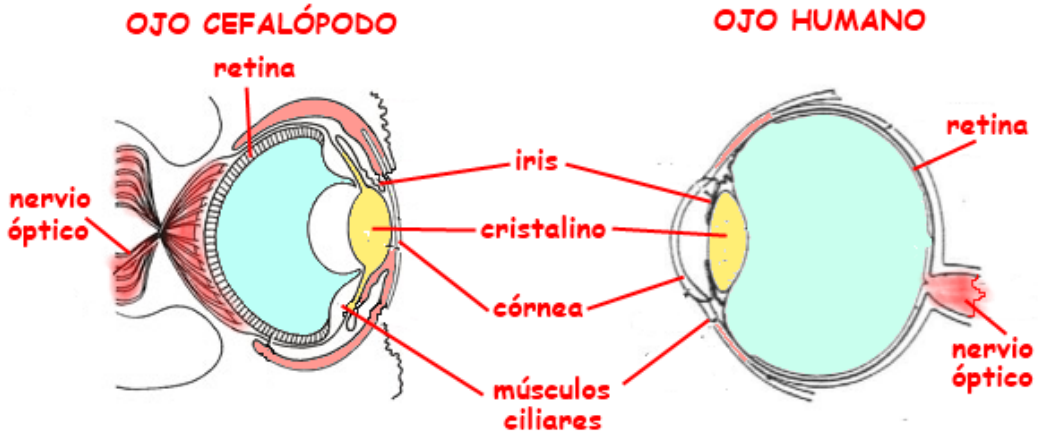
Continuaremos ahora despiezando un trascendental órgano cuya evolución ha suscitado mucha curiosidad y ha generado infinidad de palabras: el ojo. Antes de seguir leyendo te puede resultar interesante el repasar los estudios teóricos de los biólogos suecos D. E. Nilsson y S. Pelger sobre la evolución de un ojo que ya explicamos en el capítulo 21 en el que hablábamos sobre "*La posibilidad real del cambio*".

Evolución del ojo

Desde nuestra perspectiva de *Homo sapiens* es fácil imaginar que la capacidad de reaccionar frente a estímulos luminosos ha tenido que ser, obligatoriamente, una habilidad favorecida por la selección natural. Tanto es así que se cree que el ojo o un mecanismo similar se inventó en la naturaleza unas sesenta veces, todas ellas de forma independiente. Los organismos que hubiesen adquirido aquella sensibilidad podían orientarse, nadar hacía la superficie para conseguir alimento y energía, u ocultarse cuando se intuía una sombra amenazadora, por lo que se salvaba de ser predado.

¿Cómo se pudo desarrollar la capacidad de percibir la luz? Por un lado, observamos que en la naturaleza hay animales de especies muy remotamente relacionadas que tienen ojos muy parecidos, como pueden ser los cefalópodos y los mamíferos. Por otro lado, también es evidente que hay muchas alternativas diferentes, tantas como necesidades: desde una célula fotosensible hasta un complejo ojo semejante a una cámara fotográfica. Se podría pensar que el azar evolutivo ha debido ser actor principal en este reparto. Y

siendo esto así, hay evidencias muy consistentes de que, aún manteniendo la diversidad, todo tuvo un primitivo comienzo común. Idénticos genes son los responsables en todos los animales que ven.



Similitud entre el ojo humano y el del cefalópodo. La gran diferencia es el orden de situación del nervio óptico y la retina. En el humano el nervio va por delante y en el cefalópodo por detrás. Un ejemplo más de evolución convergente.

Dejando volar un poco la imaginación nos adentramos aún en estas zonas tan profundas en el tiempo. Podemos percibir una gran semejanza entre las células fotorreceptoras de los ojos y las células fotosensibles con las que las plantas realizan su fotosíntesis. En ambos casos un fotón incide sobre una particular molécula excitándola energéticamente, de forma que la deja en una situación inestable. Como no podía ser menos, pues es lo que normalmente le pasa a cualquier molécula que la han arrancado de su nivel más bajo de energía, se desexcita espontáneamente emitiendo un cuanto de energía. En la planta se transforma en un hueco por donde se cuela el primer electrón de la cadena de transporte, como ya sabemos del capítulo 07 de este libro, mientras que en los animales inicia la señal química desencadenante de una señal nerviosa. La base del invento no es muy sofisticada; cosa muy distinta es lo que se consiguió hacer más tarde con estos sencillos inicios.

El hecho de ver es una combinación de sensibilidad y definición, entre percibir la luz por un lado, y por otro saber exactamente qué

es lo que se tiene delante. Lo primero lo consiguen las células fotorreceptoras, y lo segundo la estructura física del órgano de la vista, su mayor o menor evolución hacia una cámara con lente. Cada animal con percepción luminosa ha llegado hasta la combinación más conveniente para él. En el fondo del mar, donde llega tan poca luz solar, es preferible tener agudizada la sensibilidad y no perder ni un solo fotón, prescindiendo a cambio de cualquier estructura de enfoque de imagen que tape su camino. Y donde hay mucha luz se puede sacrificar eficacia lumínica a cambio de una mayor definición de imagen. El saber simplemente que algo pasa puede ser tan importante como el saber qué es exactamente lo que se acerca. Es el balance entre una retina desnuda y una retina con lentes y cámaras que enfoquen.

En la base de la sensibilidad se encuentran unas proteínas de la familia de las opsinas. En el ojo humano se encuentran en las células de la retina llamadas *conos* mientras que en las células *bastones* se encuentran las rodopsinas, cada una de estas proteínas con su ligera variante de estructura molecular. Tienen la propiedad de discriminar la luz según longitudes de onda, por lo que combinando diversos tipos de ellas se percibe un cromatismo. Los humanos discriminamos tres colores (rojo, verde y azul) en las células cono (y el blanco-negro en los bastones), pero hay animales que sólo trabajan con dos colores básicos y los hay que lo hacen hasta con cuatro. La diferencia se ha debido a duplicaciones de los genes que expresan estas proteínas, como son los Pax6, comunes en todos los animales y plantas con capacidad fotorreceptora.

Se han hecho múltiples estudios siguiendo la pista a opsinas y rodopsinas. En cuanto a las últimas se sabe que las hay de dos tipos, a las que para diferenciar llamaremos de tipos A y B. Las dos se encuentran tanto en los vertebrados como en los invertebrados. Curiosamente, los vertebrados utilizan las del tipo A *para ver* mientras que los invertebrados lo hacen con las del tipo B. Pero los vertebrados utilizan las del tipo B como base para fijar las pautas temporales biológicas, el *reloj circadiano*, mientras que los invertebrados utilizan para ello la otra rodopsina. Hay que

reconocer que no es sorprendente que una misma proteína desarrolle ambas funciones en principio tan distintas, ya que para ello las dos tienen que tener una habilidad común, y es que deben ser sensibles a la luz. Parece como que ambas rodopsinas existían ya en un antiguo ancestro común con células fotorreceptoras, y que con el paso del tiempo adoptaron distintas especializaciones. Y esto debió suceder hace más de 590 millones de años, que es el momento en el que se cree que se separaron vertebrados e invertebrados. Pero aún hay más.

En las membranas de los cloroplastos de las células vegetales se encuentran un tipo de opsinas que son muy semejantes a las de los vertebrados y a las de los invertebrados, como una mezcla de ambas. Como así sucede también con los genes que las expresan. Son estas opsinas las que orientan a las algas para optimizar su posición ante la luz y así poder maximizar su función clorofílica. El salto hacia atrás es tremendo, ya que implica un ancestral nexo de unión entre plantas y animales hace más de 1.100 millones de años. Pero incluso puede haber más.

Ya se ha comentado que los cloroplastos eran antiguas cianobacterias que entraron en simbiosis con protozoos de mayor tamaño. La evolución de esta sociedad les llevó hasta las plantas. Pero bien, pudo pasar que el protozoo hospedante fuera un animal tipo ameba y que no hubiera simbiosis sino un mero acto nutricional. De la digestión de la cianobacteria quedaron sus rodopsinas, que luego se aprovecharon usándolas para lo que sirven: la percepción de la luz. La ameba consiguió así una especie de rudimentario GPS. Hoy en día es normal que algunos moluscos, por ejemplo, coman algas para aprovechar su capacidad fotosintética formando una especie de quimera.[1] Esta hipótesis nos llevaría en la historia del "ojo" hasta un ancestro mucho más allá, en las profundidades de la vida de la Tierra.

Olvidémonos de los organismos primitivos con sensibilidad lumínica, olvidémonos de las plantas fotosintetizadoras e intentemos analizar el camino de la evolución del ojo de los

animales, en los que se desarrolló un sentido de orientación gracias a la capacidad fotosensible de algunas de sus células. Esta sencilla distinción entre luz y oscuridad fue el primer paso.

El inicio pudo ser algo semejante a lo que vemos en el actual *Euglena* -de *eu*, verdadero y *glena*, ojo- un protista fotosintético que tiene un ***organelo sensible a la luz*** en un extremo de la célula. Se trata de un pequeño estigma que esta formado por proteínas receptoras del tipo rodopsina, que permiten a la célula situarse en una zona con la cantidad optima de luz para realizar la fotosíntesis, acercándose por fototaxis o alejándose por fotofobia al activarse un flagelo que induce el movimiento. Este primitivo "ojo" es solamente sensible a la luminosidad, siendo capaz de determinar si hay luz o no, aunque no puede discernir forma alguna ni mucho menos formar imágenes.



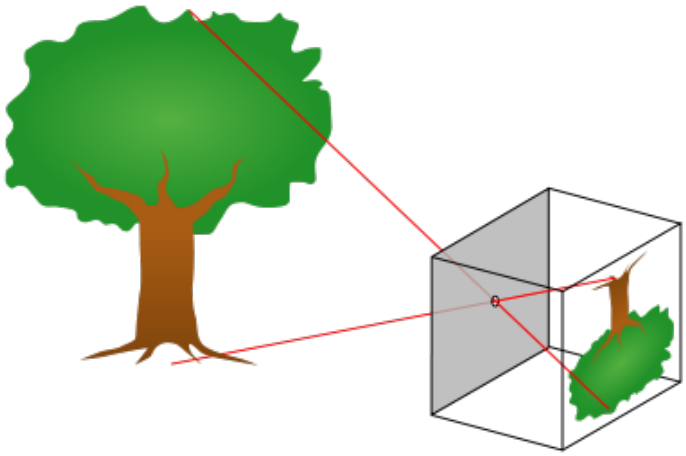
Euglena (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El siguiente paso involucraría a un animal pluricelular que ya habría desarrollado una ***capa de célula*s** sensibles a la luz. Esto lo podemos encontrar en las lombrices de tierra actuales y en anélidos acuáticos, los cuales presentan una capa ordenada de células fotosensibles.

Los nuevos pasos en la evolución del ojo se fueron dando siguiendo la estrategia de captar una mayor cantidad de luz incrementando la superficie sensible. Podemos imaginarlo de la

siguiente manera: si tenemos una lámina de células sensibles a la luminosidad e invaginamos dicha lámina en forma de "U" formando una figura cóncava que podríamos denominar "***ojo en copa***", obtendríamos una disposición espacial en donde cabe un mayor número de células fotorreceptoras. Dependiendo del lugar del donde provenga la luz se iluminarán diferentes partes de la superficie del "ojo en copa". Esto quiere decir que se podría así detectar de qué dirección proviene la luminosidad. Para los animales con ojos en copa, como los gusanos planos, esto representa una gran ventaja evolutiva, ya que les permite determinar la ubicación de presas o depredadores dependiendo de la fuente de luminosidad y las sombras. El molusco gasterópodo *Patella* -la lapa- dispone de una estructura así.

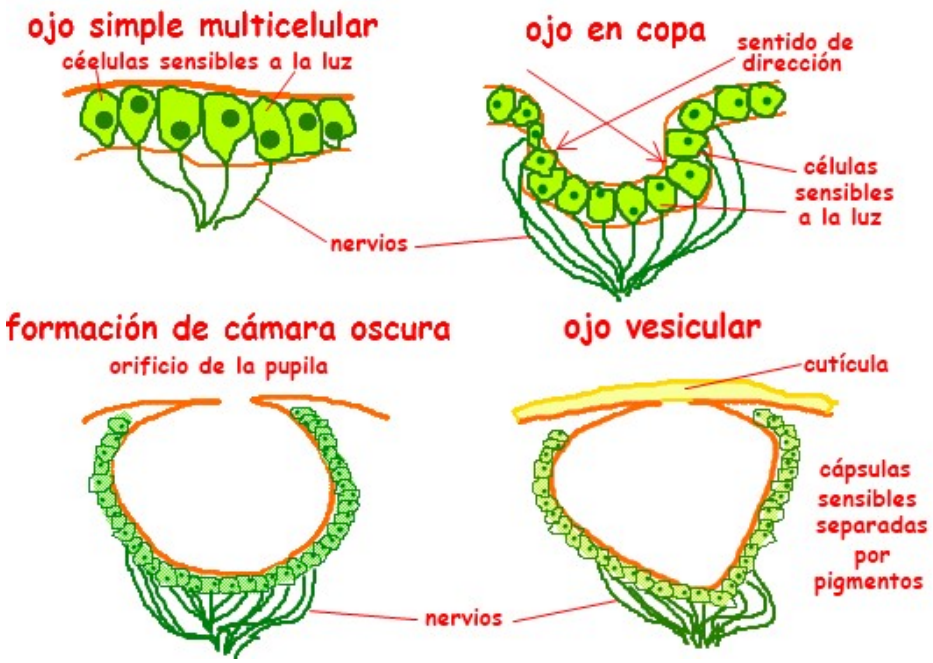
En el gasterópodo *Pleurotomaria* encontramos una estructura invaginada mucho más profunda, y en el género *Haliotis* encontramos un ojo casi cerrado. El proceso de invaginación de la lámina fotorreceptora llega hasta un punto en que solamente queda un agujero en la parte superior, lo que produce un ojo con un mecanismo similar al de una cámara estenopeica.[2] Esta clase de ojo proporciona una visión borrosa y poco detallada, pero permite determinar algunas formas simples. El *Nautilus*, un género de moluscos cefalópodos, cuenta con ojos simples de este tipo con los que obtienen una fantástica visión borrosa del entorno. Un gran avance.



Cámara estenopeica (Wikimedia, dominio público)

La clave para obtener una imagen más clara y que provea una buena visión se encuentra en la ***lente***, la cual es la encargada de refractar la luz de manera tal que la imagen se capte con una gran nitidez.

Continuando en los tiempos cámbricos, sabemos que vamos a encontrarnos con los cnidarios, medusas o pólipos. En algunos de sus actuales tataranietos se pueden localizar ojos en copa con lentes rudimentarias que provienen de la epidermis. Quizás los ancestros también los tenían. Sin embargo, los primeros ojos en donde se han podido observar lentes son los de los fósiles de los trilobites tempranos, hace unos 540 millones de años. Sus lentes no eran orgánicas, como pueden ser las de los ojos de los vertebrados, sino cristales de carbonato cálcico. El cristal de carbonato cálcico presenta una estructura en forma de rombo con un eje principal prácticamente transparente a la luz.



Evolución del ojo

También las estrellas de mar del tipo ofiuroideo disponen en sus brazos unos orgánulos semejantes a los ojos con lentes de calcita. Al estudiar su desarrollo se ha visto que una particular proteína

hace de catalizador inicial en el crecimiento de los cristales de carbonato cálcico. Lo mismo les pasa a los ojos de las actuales cochinillas de mar repartidos por la superficie de su exoesqueleto, con unas lentes de aragonito, otra forma cristalina del carbonato cálcico, que es capaz de enfocar adelantando o retrasando su posición. Bien pudo suceder algo parecido hace 540 millones de años con los trilobites.

Más tarde se debió desarrollar paulatinamente en algunos organismos una capa de líquido de textura gelatinosa que hizo las veces de lente más transparente, y que permitió enfocar los objetos mejorando notablemente la visión de los animales. En los humanos esta capa está compuesta por unas membranas rellenas de una proteína llamada cristalina. El *Anfioxus*, que ya conocimos al hablar del Cámbrico y cuyos ancestros datan de hace unos 560 millones de años, dispone de un sistema visual que se postula como un puente entre los ojos de vertebrados y los de invertebrados.



Ojo compuesto de un insecto (Wikimedia, GFDL 1.2) y efecto pixelado de la imagen conseguida según el número de omatidios

Y no podemos abandonar este tema sin dejar de hablar de los ***ojos compuestos***. Se presentan como una solución al problema de captar la máxima cantidad de luz, en este caso abriendo múltiples vías de entrada. Esta solución la han adoptado ciertos artrópodos, como insectos y crustáceos, y ya se conocía en fósiles del Cámbrico, algunos de los cuales tenían más de 3.000 lentes. Consiste en la agrupación de entre 12 y varios miles de unidades receptoras llamadas omatidios. Los omatidios son unidades sensoriales muy simples formadas por células capaces de distinguir entre la presencia y la falta de luz y en algunos casos capaces de diferenciar

los colores. La imagen que percibe un artrópodo es el conjunto de señales de los múltiples omatidios, como una imagen pixelada, orientados en direcciones diferentes, lo que le permite detectar movimientos muy rápidos. Contrariamente a otros tipos de ojos, no tiene una lente central, lo cual implica una baja resolución de imagen.

En resumen, una ruta impresionante en la que el medio ambiente y la selección natural, e incluso la simbiogénesis, habrían apacentado el proceso dando los impulsos necesarios como para perfeccionar la habilidad obtenida a partir de unos pigmentos fotorreceptores, hasta hacerla llegar a la complejidad de los ojos de los mamíferos superiores o de los cefalópodos.

A partir del próximo capítulo daremos un cambio significativo y volveremos al devenir cronológico, despidiéndonos del Cámbrico para entrar en el periodo Ordovícico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 27:

1. En paleontología una **quimera** es la interpretación errónea de un organismo extinto basado en la reunión de dos o más elementos fósiles procedentes de diferentes especies.
2. Una **cámara estenopeica** (del griego στένω/*steno* estrecho, ὀπή/*ope* abertura, agujero) es una cámara fotográfica sin lente, que consiste en una caja estanca a la luz con sólo un pequeño orificio, por donde entra la luz, y un material fotosensible.

28. El Ordovícico

En los últimos capítulos nos habíamos desviado del relato biográfico que estamos intentando hacer. Desde aquel en que compartimos mesa y mantel con la biota del Cámbrico, el 18, impresionados por su repentina exuberancia, solamente nos hemos dedicado a estudiar sus avances en habilidades y morfologías.

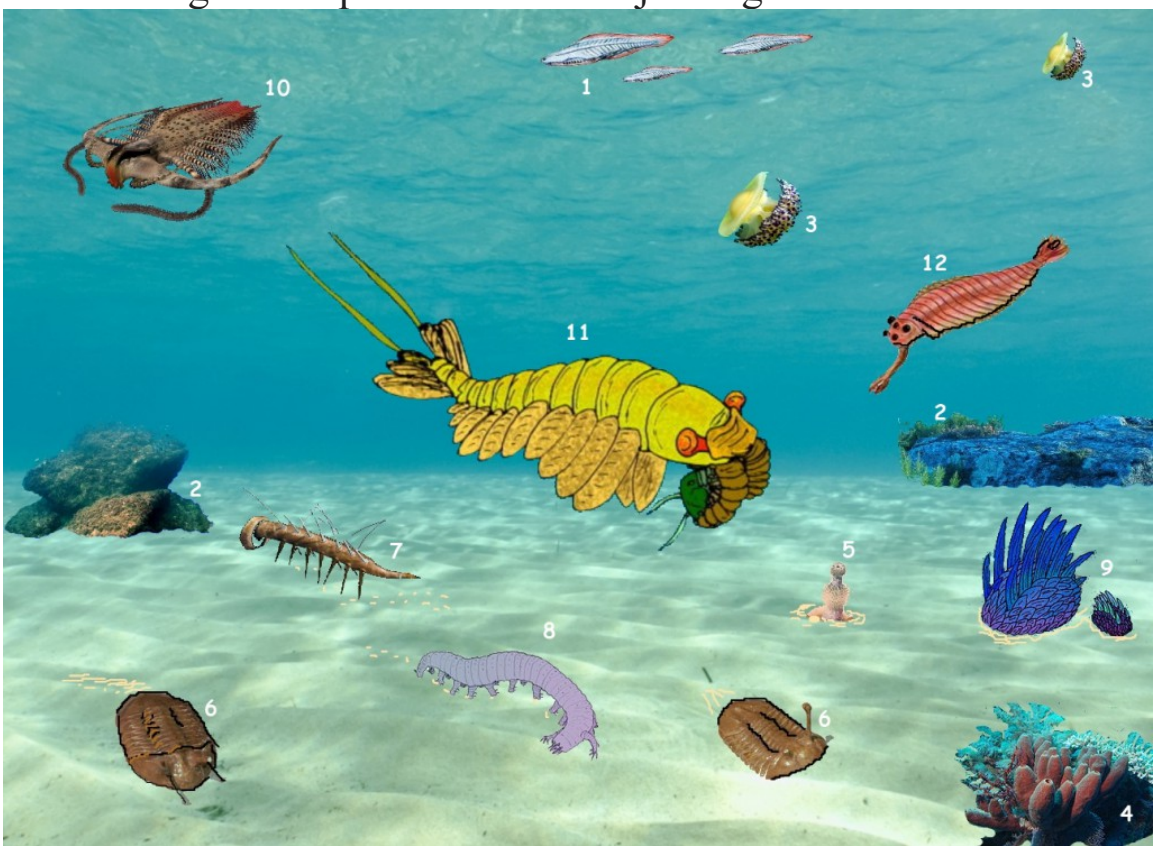
Hoy seguimos con el relato retomando su orden cronológico. Vamos a adentrarnos en un nuevo periodo: el Ordovícico. Aunque antes permitidme que tenga una licencia con vosotros, sufridos lectores, ya que comenzaré con una breve historia imaginada que espero nos sirva de enlace y recuerdo de aquel momento cámbrico que se perdió hace ya diez capítulos.



Un novelesco recuerdo al Cámbrico

El día iba declinando tranquilo. La tarde, templada y agradable. Costaba respirar un poco, ya que el nivel de oxígeno era un 30% inferior al actual, pero la atmósfera era clara. Las últimas nubes desaparecían detrás de las nuevas montañas, sinfonía de ocres y grises. Áridas y desnudas, rocosas y polvorientas, arañadas por las escorrentías del agua de las lluvias pasadas. Los torrentes saltaban rápidos y las corrientes sólo se frenaban una vez llegadas a las llanuras sedimentarias. Aquel día no soplaba el viento que lija las tierras desnudas y arremolina el polvo. Se podía oír el crepitar

lejano de un volcán. Nada se movía, a excepción del agua del río próximo, remansado de vez en cuando como queriendo competir con las charcas de la lluvia. Su verde fondo daba una alegría a las tonalidades ocres y grises del paisaje. Salpicando los bordes de las charcas, unas manchas marrones, limosas y aterciopeladas, formaban unos tapetes húmedos, colonias bacterianas de las que se alimenta algún lobopodio solitario bajo el agua.



Panteón zoológico del Cámbrico (ilusión artística tras recorta y pega del autor, imágenes de Wikimedia) Podemos curiosear la numeración en el texto que acompaña.

La vista se dirige ahora hacia una playa cercana en donde las olas rompían mansamente, como correspondía a la calma tras la tempestad de primeras horas de la tarde, removiendo las arenas entre las que se veían infinidad de restos de conchas y caparazones, o así lo parecían. A pesar de los arrastres del río cercano, las aguas permanecían tan claras que nos pareció ver en ellas un enjambre que se movía rápidamente, reflejos diminutos y brillantes que contrastaban con la quietud de tierra firme. La atención

se desvía hacia estos destellos. El enjambre se acercó curioso: se trataba de un pequeño banco de *Haikouitchtys* (1, ver imagen de la página anterior) que estaba dando cuenta de algún resto orgánico que las olas habían aproximado a la orilla.

Bajo ellos, como podemos imaginar de la imagen, el panorama cambiaba drásticamente. Lo que fuera era un mundo vacío, en la protección del agua era un bullicio tremendo. Grandes colonias de algas (2) escondían pequeñas larvas de los animales que poblaban aquel mundo. Por encima, las medusas (3) se dejaban llevar. Tranquilas esponjas (4) abrían su tremenda boca superior expulsando el agua que habían filtrado, ancladas sobre un arrecife que quizás fuera de coral. Semienterrados en la arena asomaban las redondeadas cabezas de los priapúlidos (5). Un mundo idílico en apariencia, ligeramente alterado por algunos trilobites (6) silenciosos y veloces, así como por otros artrópodos como la *Hallucigenia* (7), esa especie de palo con pinchos que camina hacia las rocas.

En primer plano podemos observar a un alargado *Aysheaia* (8) dirigirse a su hábitat natural de las formaciones de esponjas, mientras un par de *Wiwaxias* (9) a la derecha de la imagen pasean apaciblemente sobre el fondo marino.

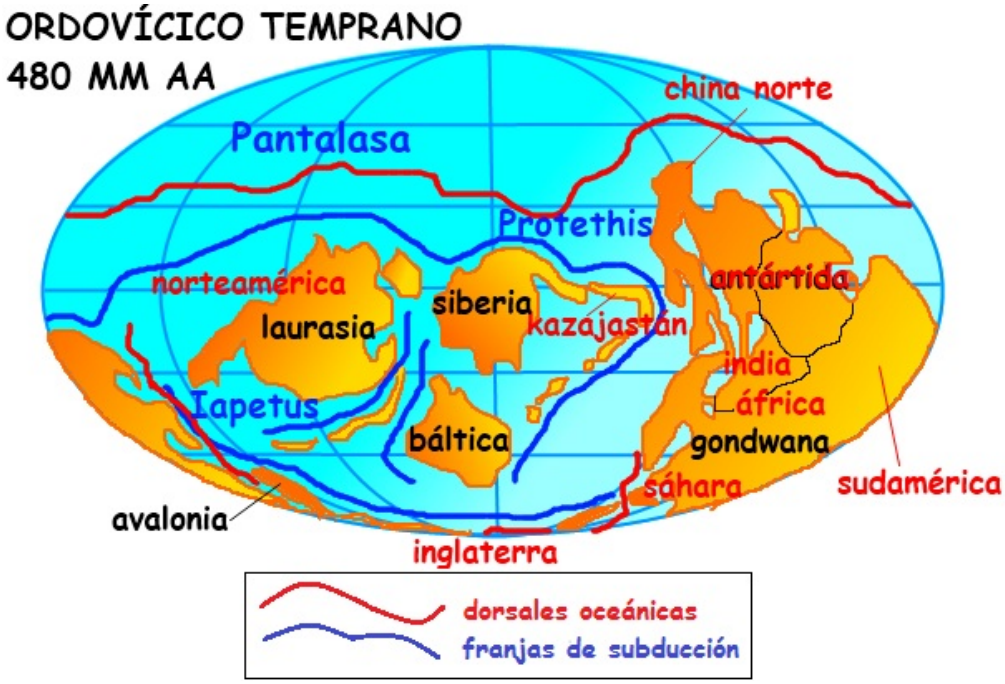
De repente la escena parece alterarse. Una *Marella splendens* (10) huye despavorida por el ángulo superior izquierdo de la imagen. Alguna amenaza se cierne sobre la comunidad marina. Efectivamente, un monstruo gigantesco planea entre dos aguas en busca de su presa. El *Anomalocaris* (11) fija sus ojos sobre un trilobites que intenta ocultarse miméticamente en el fondo arenoso, pero no lo consigue. El depredador le ha visto y le parece buena presa. La primera acometida voltea al trilobites que se cierra como una bola. Pero da igual, las mandíbulas potentes de su enemigo consiguen abrir un camino hacia sus partes blandas y suculentas. Mientras, una *Opabinia* (12) observa con sus múltiples ojos negros a la espera de dar buena cuenta de los restos del banquete. La

escena dura unos minutos, tras los cuales el *Anomalocaris* se aleja silencioso y ondulante.

Fuera, el sol se había ocultado, en la inmensidad del espacio lucían las estrellas. Aquella noche iba a ser la antesala del Ordovícico.

Bienvenido al Ordovícico. De hace 488 hasta hace 444 millones de años.

Su nombre proviene del de la tribu celta de los ordovicos. Continúa la explosión del Cámbrico. La vida sigue en el agua y se inicia la excursión de los vegetales sobre la tierra.



Los continentes siguen la deriva balanceándose en el sentido de las agujas del reloj. Gondwana era el mayor y ocupaba un espacio entre el polo sur y el ecuador, moviéndose hacia una posición austral. Sobre él, ocupando sitio entre los dos trópicos, los continentes de Laurasia y Siberia, los más boreales, y Báltica y Avalonia, los más australes. Entre ellos, el océano Iapetus que se iba estrechando por la deriva de placas, aproximando Báltica y Avalonia a Laurasia, lo que mucho más tarde, en el Silúrico, conformaría el movimiento orogénico Caledoniano.

Los mares tenían un nivel muy elevado, de forma que habían entrado en tierra firme, por lo que abundaban las aguas someras. Por el contrario, no eran muchas las tierras emergidas, lo que hacía que las rocas de esta época generalmente no eran el resultado acumulativo de la erosión de los continentes, sino que en su mayoría eran rocas sedimentarias de procedencia inorgánica, sedimentos marinos de carbonato cálcico-magnésico que formaron capas de calizas al precipitar los carbonatos disueltos que provenían de la meteorización de las rocas. Esta abundancia de carbonato cálcico se notó también en el tipo de conchas y protecciones externas de la fauna.

Dada la posición de los continentes, el clima era en su mayoría cálido y tropical (incluso en lo que más tarde sería la Antártida), menos en el Ordovícico tardío, cuando Gondwana ocupó posiciones cercanas al polo sur y, por diversas circunstancias que luego comentaremos, se afrontó un periodo glaciar.

En aquel momento, hace 460 millones de años, la concentración de CO_2 en la atmósfera era entre 14 y 22 veces los actuales niveles, y el Sol era menos luminoso de lo que es ahora.

La biosfera

La fauna que venía del agitado y vital Cámbrico seguía en el mar. Se vio favorecida por las condiciones climáticas y marinas y continuó floreciendo en el Ordovícico. En las futuras Norteamérica -de la que sólo emergía Canadá- y Europa, el Ordovícico fue un tiempo de mares someros continentales ricos en vida. Por el contrario, la tierra era zona inhóspita, árida y sin posible alimento. En este escenario se comenzaba ya la *colonización por parte de las plantas*, paso inicial para el asalto posterior de los animales.

Los ecosistemas marinos no eran muy diferentes de los actuales. La escalada armamentística entre predados y predadores que se había iniciado en el Cámbrico se consolida ahora. La abundancia de carbonatos en los mares permitió un *incremento del desarrollo de esqueletos biomineralizados* y de otros adminículos, como placas o

espículas, que suponemos prevalecieron por su utilidad para la defensa. Como consecuencia de ello se observa en esta época un incremento de trazas erosivas producidas por los animales, que se conoce como la revolución bioerosiva del Ordovícico.

Y éste sería el catálogo general de los individuos que se movían por el escenario: Un mundo planctónico[1] de algas y larvas sobrenadaba en la superficie de las aguas, favorecido por las buenas temperaturas y las grandes extensiones de aguas poco profundas. En los fondos marinos abundaban los animales invertebrados, equinodermos, esponjas, hidrozoos, briozoos, que continuaban con sus estrategias alimentarias de ramoneo al azar, según decidían las corrientes. Mientras, los moluscos y artrópodos iban imponiéndose en los océanos. Por su lado, los peces, primeros vertebrados de la Tierra, continuaron con su evolución iniciada en el Cámbrico.



Fósil de graptolite Didymograptus murchisoni (Wikimedia, CC BY 2.0 Generic)

Los ***graptolites*** ("*escrito en piedra*") son fósiles de unos animales coloniales que vivían en soportes de colágeno. Se parecían a gusanos hemicordados y eran muy abundantes. Solían permanecer anclados en el fondo marino, aunque algunos vivían inmersos en la sopa del plancton, entre el cual flotaban a la deriva. Su variedad y su persistencia en el tiempo fueron grandes, de tal manera que su

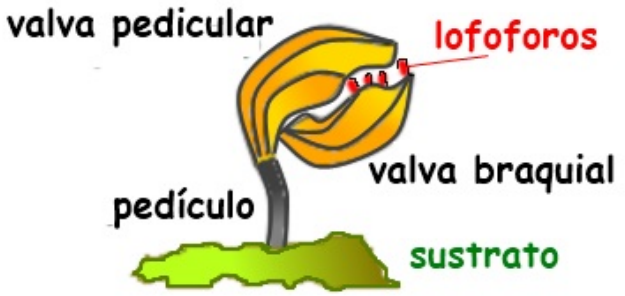
análisis permite hoy en día determinar la edad del estrato en donde se encontró el fósil.

Los ***corales*** solitarios se remontan por lo menos al Cámbrico, pero es en el Ordovícico cuando empiezan a formarse los arrecifes coralinos, con diversas morfologías -tubulares, abanicos, túmulos…- sobre los que se asentaban algas y constituían un buen refugio donde proliferaba el resto de la fauna marina.



Briozoo actual de agua dulce (Wikimedia, GFDL 1.2)

Al igual que los primeros arrecifes de coral, los ***briozoos*** ("*animal musgo*") aparecieron durante el Ordovícico. Son animales semejantes a los braquiópodos ya que disponen de una corona de pequeños tentáculos junto a la boca y viven en un tubo calcáreo o quitinoso anclado al fondo marino.



Morfología de un braquiópodo, que nos recuerda la solución vital de un animal filogenéticamente muy distinto, un artrópodo como el percebe.

Los ***braquiópodos*** ("*corto pie*") parece ser que derivaban de gusanos que vivían protegidos enterrados en las arenas y limos, asomando sólo la cabeza junto a la que se encontraba una corona de tentáculos que facilitaba la alimentación. La evolución les llevó a desarrollar un par de valvas, una superior y otra inferior, unidas en su región posterior, junto al extremo de la boca. Sus perforaciones son muy abundantes entre los restos fósiles.

Entre los ***artrópodos*** destacaban los trilobites y los escorpiones de mar.

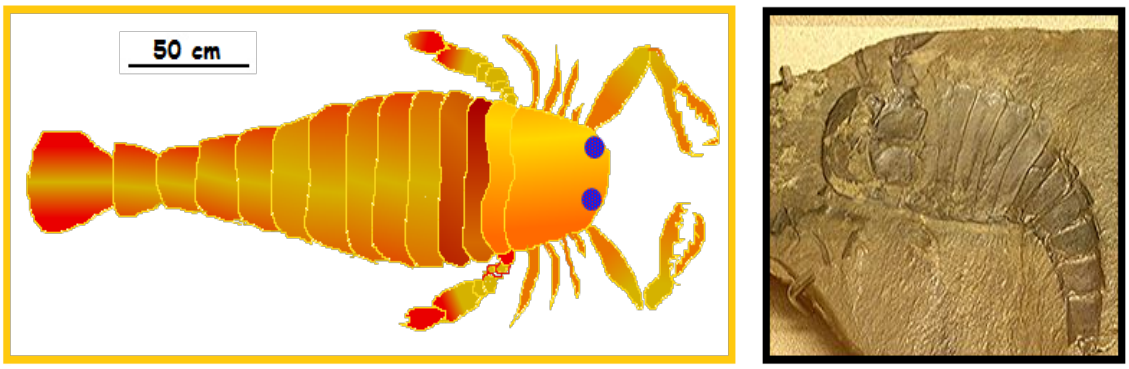


Fósil del trilobites Dalmanitina proaeva y un ojo fosilizado de estos artrópodos (wikimedia, dominio público y litos.net)

Los trilobites ("*tres lóbulos*") eran unos animales segmentados que presentaban una cabeza "acorazada" con unos ojos compuestos sorprendentemente evolucionados, análogos a los de parientes actuales como los crustáceos e insectos. Se cree que por lo general habitaban en aguas poco profundas, filtrando el barro del fondo en que vivían para obtener el alimento. Ante una amenaza se doblaban formando una bola.

Durante este periodo apareció otro artrópodo, el *Eurypteridus* ("*ala ancha"*) mal llamado escorpión de mar, que destacaba por haber alcanzado los mayores tamaños entre los de su clase (llegó hasta los 2,5 metros). Tenía un par de apéndices con pinzas -aunque a diferencia de los escorpiones actuales eran como una base con púas-, la cola parecía un tenedor plano para remar en el agua y no poseía un aguijón a diferencia de los escorpiones terrestres actuales. Tenía dos ojos compuestos y en la boca poseía un par de

quelíceros parecidos a las tenazas, también con púas. De aspecto muy amenazador, eran unos predadores que se alimentaban de trilobites y pequeños peces, pero a su vez eran apresados por los ortoconos.



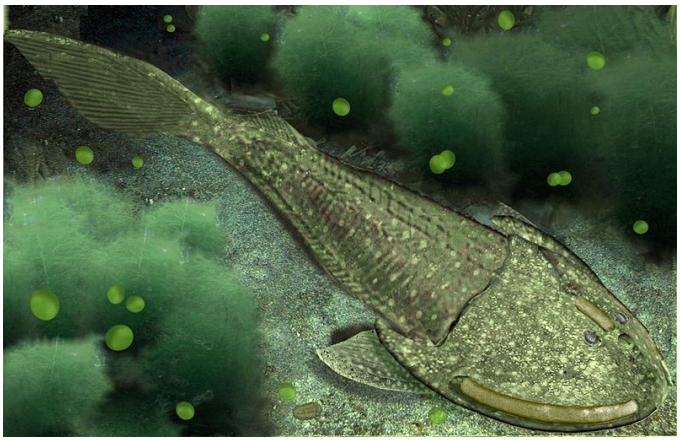
Reproducción artística del escorpión marino Jaekelopterus rhenaniae y fósil del euripterido Megarachne (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los ***moluscos*** que habían aparecido durante el Cámbrico o incluso ya en el Ediacárico, se convirtieron en comunes y variados, especialmente los *bivalvos* -dos valvas laterales generalmente simétricas-, los *gasterópodos* y los *cefalópodos nautiloideos*. Entre estos últimos, los ortoconos ("*cuerno recto*"), que fueron unos moluscos de gran tamaño, tanto como un autobús, similares a un calamar gigante pero que presentaba una concha en forma de un largo y esbelto cono con la que protegía a todo su cuerpo.



Representación artística y fósiles de un ortocono (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los primeros ***vertebrados*** que aparecieron en el Cámbrico continuaron en el Ordovícico. Se tratarían de pequeños peces de agua dulce o de aguas marinas próximas a la costa, los *Pteraspidomorfos* y más tarde los *Ostracodermos,* de aspecto aplanado y unos apéndices carnosos, precursores de las aletas, que les daban estabilidad en la natación. No poseían mandíbula y se alimentaban por filtración de detritos y agua mediante las branquias, que a la vez utilizaban para respirar. Su característica principal, además de ***no tener mandíbula***, es que su cabeza estaba protegida por una ***placa ósea*** cuyo análisis tisular microscópico evidencia que era como una armadura formada por pequeños dientes soldados, con una capa externa de esmalte y una interna de tejido de dentina.



Recreación del ostracodermos Cephalaspis (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Habrían desarrollado la coraza de la cabeza como defensa contra los predadores que le acompañaban en las aguas donde vivían. No olvidemos que convivían con los conodontos con sus raederas llenas de dientes, o bien con la amenaza de los escorpiones marinos y de los ortoconos, que atacarían a los pequeños peces primitivos. Por eso desarrollaron la estrategia de defensa armando sus cabezas, lo que les dio únicamente un respiro momentáneo, ya que al final del periodo se inventó la mandíbula, terrible cascanueces al que no se le resistirían protecciones óseas y con las que además se podía atacar y morder a piezas mayores.

El mundo de las plantas y hongos

Mientras, hace unos 450 millones de años, las ***plantas*** en forma de algas verdes poblaban, en busca de la luz, las primeras capas de los fondos marinos, *formando tapetes* sobre las rocas o bien estructuras filamentosas y ramificadas. Constituían la base de alimento para muchos de los animales anteriores, y colaboraban en gran manera mediante su función clorofílica al mantenimiento del oxígeno atmosférico. Necesitaban vivir en la humedad, y poco a poco a lo largo del Ordovícico fueron colonizando las corrientes fluviales, que hasta este momento sólo habían disgregado las áridas, grises y ocres tierras.



Criptoesporas de hace 470 millones de años, halladas en Argentina (revista New Phytologist, octubre 2010, fair use)

Paso a paso se iban asentando, mezcladas con los limos de las orillas, para lo cual tuvieron que adaptar sus métodos de reproducción a la cambiante humedad del terreno. En tierra continuaron manteniendo su ciclo reproductivo mediante una primera fase sexuada, con especímenes masculinos y femeninos, seguida de otra posterior de creación y emisión de esporas. Las esporas se desperdigan fácilmente gracias al arrastre producido por los vientos, no perdiendo la ventaja de la que disponía su esperma cuando habitaban en el agua. La consecuencia es que tenían a su alcance a grandes extensiones territoriales, incluso con condiciones ambientales extremas dada su particular estructura, lo que les permite también perdurar mucho en el tiempo en estado latente. Se han encontrado en Argentina “criptoesporas” fósiles datadas en hace 470 millones de años.

A pesar de que la capa de ozono era una realidad desde hacía muchos millones de años, el hecho de salir fuera del agua supuso el perder el escudo protector frente a las radiaciones ultravioletas del que sí disponían al estar sumergidas. Sin embargo, desarrollaron un truco.

Mediante un proceso evolutivo, las proteínas gestoras del almacenamiento de ácidos grasos, las que se encargan de que las esporas y más tarde las semillas dispongan del material alimenticio suficiente para su desarrollo inicial, se transformaron en enzimas que colaboraron en la fabricación de los flavonoides coloreados, amarillos y anaranjados, que protegían a las células de la acción solar y ayudaban en la fijación del nitrógeno del suelo.

El primer paso hacia una Tierra verde se llevó a cabo a través de los tapetes de plantas livianas y pequeñas, que por su tamaño aún no necesitaban una especial estructura vascular para distribuir la humedad y el alimento por todo su organismo, y que prosperaban junto a ríos y charcas, asomando sus incipientes brotes por encima de las aguas y los limos en busca de la energía de la luz solar. Sus raíces eran simples apuntes de pelillos y sus "hojas" algún ensanche del tallo que protegería a algún nuevo brote. Las primeras plantas fueron las briofitas -"*planta musgo*"-, del tipo de los musgos y las hepáticas.



La briofita actual Phaeoceros laevis (Wikimedia, GFDL 1.2)

Muchos biólogos actuales sugieren que las plantas no hubieran tenido éxito en su colonización de la tierra si no hubiera sido por la colaboración de los **hongos**. Y que posiblemente la ayuda fue recíproca, ya que los hongos en tierra necesitan de detritos vegetales o animales para alimentarse, así que debieron ir juntos en la aventura. Quiero enfatizar que estamos hablando ya de antepasados de los líquenes y micorrizas actuales. Me parece asombroso que las estrategias de mutualismo entre ambos reinos, que tanto benefician a todo tipo de plantas desde las algas hasta las coníferas y las plantas con flores, iniciaran su andadura hace ya muchos años.

Esta circunstancia hace que se le pueda seguir la pista a la evolución de los hongos, ya que, si bien no es fácil que dejen restos fósiles, a no ser sus esporas o posteriormente en gotas de ámbar, sí han podido ser estudiados y descritos al analizar los restos fósiles de plantas que sabemos mantenían una estrecha relación con ellos, lo que ha impulsado el profundizar en los análisis hasta descubrir los restos fúngicos unidos a ellas.

De esta época, hace 460 millones de años, son los primeros fósiles reconocibles de hongos del tipo de los *Glomerales*, que consisten en hifas ramificadas y esporas terminales no asociadas con las plantas. Se encontraron cerca de Madison, Wisconsin.

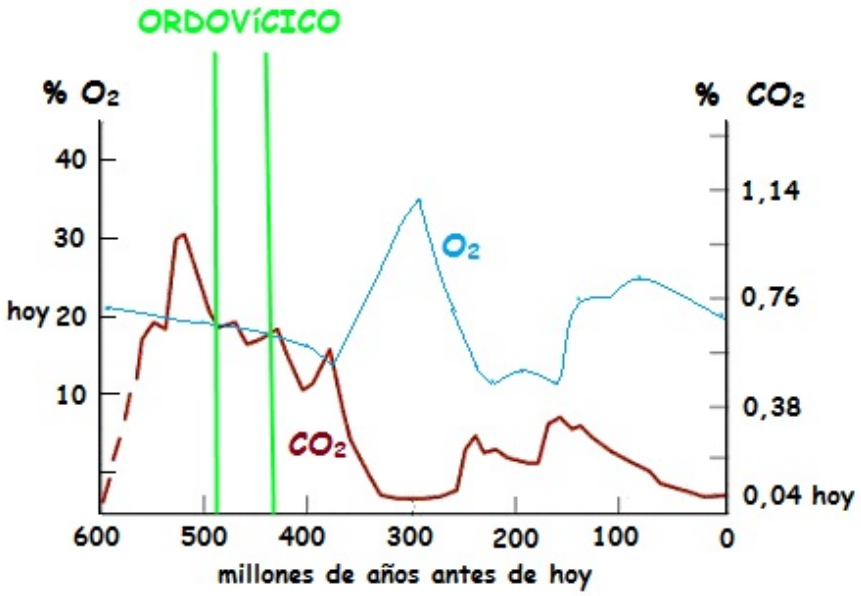
Por su lado, también en el mundo animal se producían ciertos escarceos para colonizar las tierras. Se cree que algunos artrópodos, como los escorpiones marinos y trilobites, y unos pocos gasterópodos, animados por la incipiente vegetación, iban abandonando temporalmente las aguas para llegar a las orillas. No por eso pueden ser ya considerados animales terrestres, dado que tenían necesidad de regresar constantemente al medio acuático para respirar con sus branquias o para depositar sus huevos.

Se acaban los tiempos placenteros

Los últimos años del Ordovícico se caracterizaron por la extrema severidad del clima, que pasó de cálido tropical a glaciar. La

variación se debió, por un lado, a que Gondwana pasó a ocupar la posición del polo sur y, por otro, a que se estaba viviendo una larga fase con tendencia a la disminución de la concentración atmosférica de CO_2 y por tanto a una disminución global del efecto invernadero.

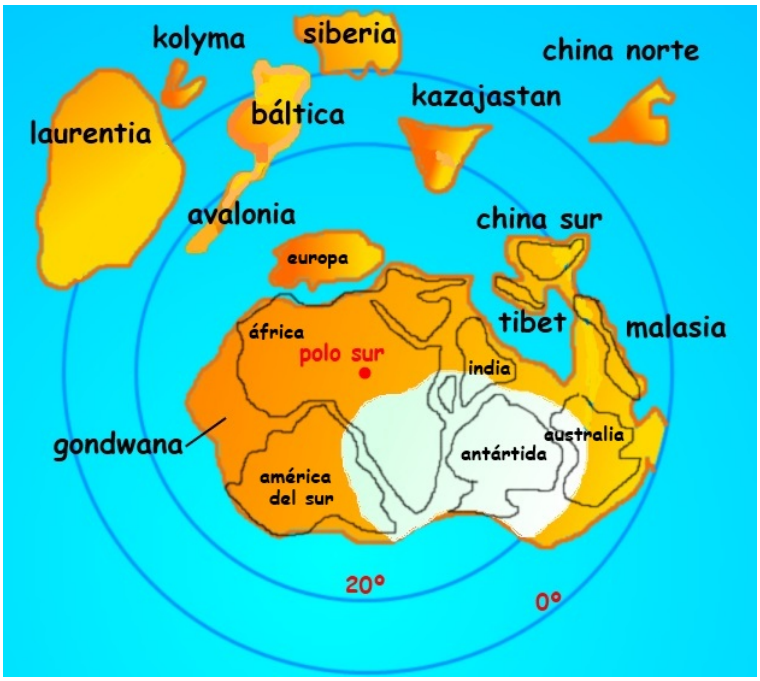
La disminución del dióxido de carbono fue posiblemente producida por efecto de la superactiva función clorofílica, favorecida por el excelente clima, y también por el incremento en la fijación de carbonatos en los sedimentos marinos, que secuestraban una buena parte del carbono atmosférico. Hay teorías que indican que las propias plantas terrestres habrían iniciado el proceso de fijación de carbonatos, puesto que se sabe que con su metabolismo debían extraer de las rocas sobre las que crecían iones minerales como calcio, magnesio, fósforo o hierro. El posterior lavado de estos minerales por las aguas de lluvia habría llevado los iones hasta el mar habiendo formado rocas carbonatas en el océano a partir del dióxido de carbono disuelto. A la vez se iban añadiendo a los océanos nutrientes como el fósforo y el hierro, lo que habría aumentado aún más las poblaciones de plantas marinas y en consecuencia la fotosíntesis de cianobacterias y algas.



Como consecuencia de todo ello, entre hace 455 y 445 millones de años la Tierra experimentó dos grandes glaciaciones. Debido a

estas glaciaciones gran parte del continente de Gondwana se cubrió de hielo. Esto provocó a su vez el descenso del nivel de los mares. La extinción de la fauna marina fue masiva, un 49% de los géneros, iniciándose en los nichos tropicales del océano Iapetus. Desaparecieron el **50% de los corales** y cerca de **100 familias biológicas**, lo que representaba el **85% de las especies de fauna**. Lo que constituyó la primera grande extinción del Fanerozoico afectó principalmente a los braquiópodos y los briozoos, junto con familias de trilobites, conodontos y graptolites.

Al inicio de la siguiente era, el Silúrico, la Tierra se había recuperado de este periodo frío, aunque posiblemente aún persistieran algunos de los glaciares de Gondwana. Pero esto lo veremos en el capítulo siguiente.



Zona de radiación de la glaciación de Godwana en el Ordovícico tardío, hace unos 445 millones de años

NOTAS DEL CAPÍTULO 29:

1. Se denomina **plancton** (del griego πλαγκτός -*planctós*-, "errantes") al conjunto de organismos, principalmente microscópicos, que flotan en aguas saladas o dulces, y que son más abundantes aproximadamente hasta los 200 metros de profundidad.

29. El Silúrico

Nos encontramos en los últimos 542 millones de años de la historia. Tras haber disfrutado de las conquistas durante el Hadeico, el Arcaico y el Proterozoico, a partir de ahora la historia presenta otro perfil al ser más conocida, ya que se dispone de infinita información comparada con la de los eones anteriores. Puede parecer que se concreta en una simple y fría nómina de actores, pero el hecho de ser más conocidos los posiciona muy próximos a nuestras emociones. ¿A quién no le interesa saber cómo una planta colonizó la tierra o quién no se excita al oír acerca de la vida de los archifamosos dinosaurios? Esta especie de nueva sensación la inauguramos con el capítulo del Cámbrico y los que le siguieron, habiéndonos quedado temporalmente expectantes tras el último dedicado al Ordovícico.

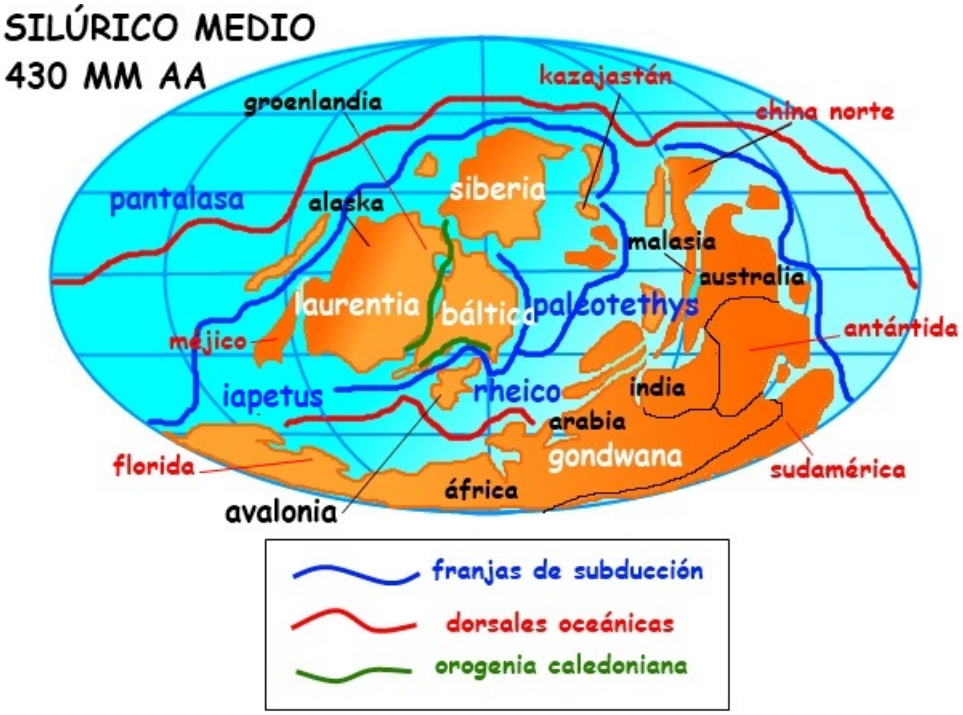


Hoy damos un paso cronológico más para adentrarnos en el siguiente periodo, conocido como **Silúrico**, que se extendió a lo largo de 27 millones de años, desde hace 443 hasta hace 416.

Como ya vimos por primera vez con el Cámbrico, y continuamos al nominar al Ordovícico, seguimos con la costumbre de nombrar a los periodos geológicos con gentilicios de tribus celtas. Esta última fue bautizada a partir de los siluros, una tribu de Gales.

Habíamos dejado el Ordovícico con Gondwana cubierta de glaciares y el mar de Iapetus cerrándose por la deriva continental de Laurentia, Avalonia y Báltica. El nivel del mar se situaba muy

bajo, debido a la enorme masa de hielo sobre Gondwana, lo que había producido una extinción masiva de vida.



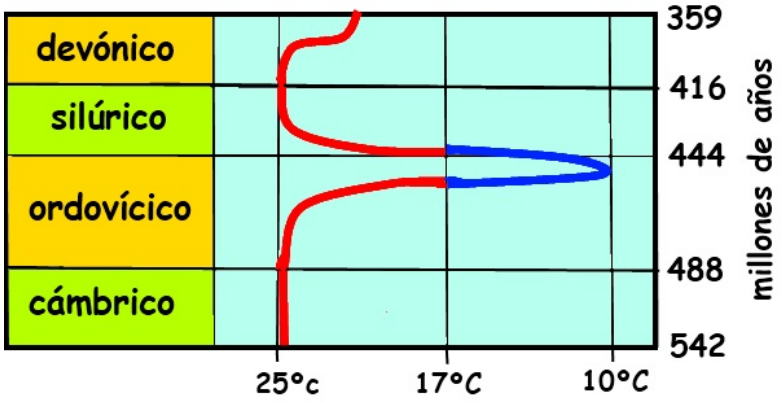
Por el contrario, el capítulo del Silúrico coincide con el comienzo de otra época de templanza climática, por lo que los hielos comenzaron a derretirse y el nivel del mar volvió a subir.

Gondwana siguió su lento balanceo hacia el sur, mientras los más modestos cratones ecuatotropicales formaban un nuevo continente llamado Euroamérica, que es el que ocupa la posición central de la figura anterior.

Cuando la proto-Europa colisionó con Norteamérica, la colisión plegó los sedimentos costeros que se habían acumulando desde el Cámbrico frente a la costa este de Norteamérica y la costa oeste de Europa. Este evento es la **orogenia Caledoniana** (Caledonia es el nombre latino para Escocia), una serie de montañas que se extendía desde el Estado de Nueva York a Europa, incluyendo Groenlandia y Noruega.

El nivel del mar llegó a ser muy elevado, lo que hizo que gran parte de las tierras ecuatoriales se vieran anegadas. Como ya se ha

comentado, esta circunstancia coincidió con un clima cada vez más benigno, lo que favoreció en gran medida el desarrollo de la vida en estas zonas.



Curva de temperatura a inicios del Fanerozoico (a partir de Paleomap Project, Ch.R. Scotese)

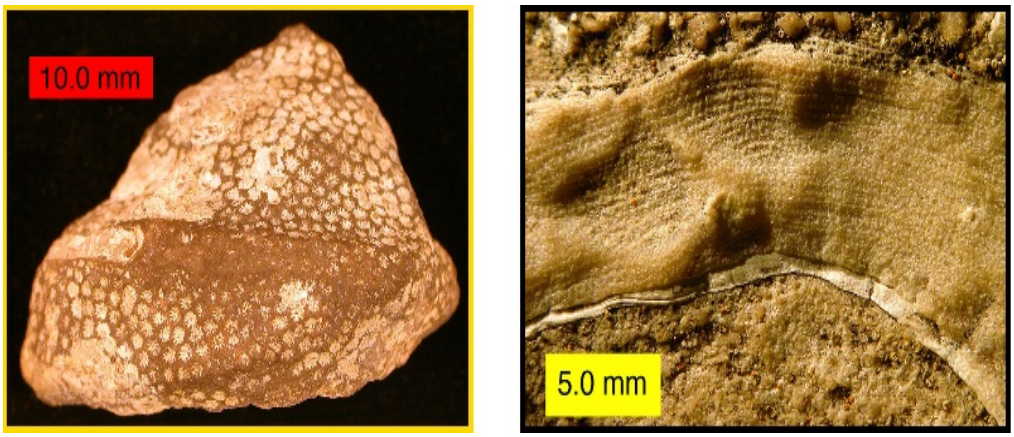
El gran océano de Panthalassa cubría la mayor parte del hemisferio norte, Tethys seguía abriéndose entre la costa occidental de Gondwana y el continente ecuatorial que iba apareciendo por la fusión de pequeños cratones, modelando entre sus tierras nuevos y antiguos océanos, como Rheico, entre Gondwana y Avalonia, Iapetus, entre Avalonia y Laurentia, y Ural, entre Siberia y Báltica.

La biosfera del Reino Animalia

Los poco profundos mares tropicales fueron uno de los principales escenarios en la representación teatral del inicio del Silúrico. En ellos se consolidaron los **arrecifes**, alcanzando unos tamaños mucho mayores que los de sus antecesores cámbrico-ordovícicos. Como en el anterior periodo, los principales artífices de estas arquitecturas fueron los briozoos (recordemos, los "*animales musgo*"), aunque poco a poco se apoderaron del paisaje los corales tabulados que construían colonias de células hexagonales, formadas por un esqueleto de calcita y con una apariencia similar a un panal.

Sobre estos sistemas coralinos se asentaba una especie de esponja, stromatoporida, que disponía de una parte rígida formada por

grandes bolas de carbonato cálcico. La fusión de ambos animales fue la que creó los mayores arrecifes de la época, de cinco a diez metros de espesor y más de un kilómetro de longitud. Las algas que se asentaban en sus declives los protegían de la dinámica de las olas, permitiendo la aparición de lagunas tranquilas en donde el crecimiento coralífero se hacía más fácil y estable.



A la izquierda el coral tabulado Protaraea, y a la derecha una esponja stromatoporida (Wikimedia, dominio público)

El entorno medioambiental creado por los arrecifes era el ideal para el desarrollo de pequeños animales. Los estudios de los fósiles acumulados en las cavidades que dejaba el armazón del arrecife dan a conocer que vivían allí una gran variedad de **invertebrados**, al igual que lo que sucede en los actuales arrecifes: braquiópodos, moluscos bivalvos, gasterópodos, crinoideos y briozoos.

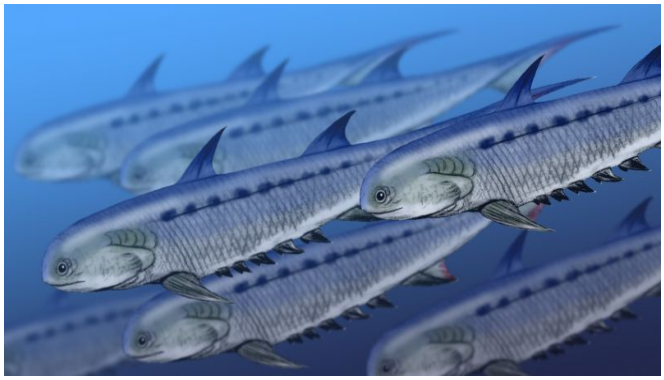
En el mar abierto los trilobites se habían recuperado de la extinción del Ordovícico, y los escorpiones marinos impartían su ley arropados por su gran tamaño, que podía incluso llegar a ser de dos metros. Estos últimos lo mismo habitaban aguas saladas como aguas dulces, lo que quizás les colocó en un lugar privilegiado para saltar a tierra. En la frontera con el siguiente periodo, el Devónico, los moluscos cefalópodos ortoconos iniciaron un cambio de su estructura lineal hacia formas de concha en espiral: los amonites, que gracias a su rápida evolución y distribución mundial son excelentes fósiles guía para la datación de rocas



Fósil de Amonites (Wikimedia, GFDL 1.2)

Otro grupo que comenzó a aumentar, como antesala al éxito de diversificación que alcanzarán en el siguiente periodo, el Devónico, fue el de los **peces**. En el Silúrico convivían los ostracodermos, peces *sin mandíbulas* que ya conocemos desde el capítulo 28 dedicada al Ordovícico, con los placodermos que fueron los primeros peces *con mandíbulas*, que aparecieron en esta época. También de este periodo son los primeros tiburones espinosos y los peces cartilaginosos, pasos decididos de los vertebrados hacia un esqueleto rígido.

Los acantodios, mal llamados tiburones de piel espinada, fueron peces pequeños, caracterizados por tener al inicio de cada aleta una gran espina ósea -menos en la caudal- a pesar de tener esqueleto cartilaginoso. No en vano acantodio significa "*con aspecto de espina*". Esta particularidad tan característica de las espinas que soportan sus aletas la comparten con los teleósteos -la mayoría de peces actuales-, pero a diferencia de éstos, y como ocurre en los tiburones, no están dotadas de capacidad motriz. Las escamas que recubren el cuerpo son muy pequeñas y apretadas, estando hechas de hueso y dentina, y crecían como proyección de las más antiguas. Sus fósiles los evidencian como los peces más primitivos con mandíbulas.



Representación artística de un banco de tiburones espinosos Climatius (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los *placodermos* se caracterizaban por la presencia de placas óseas en la parte anterior de su cuerpo, además de tener un número par de extremidades, diseño primigenio de las de los tetrápodos, y de poseer mandíbulas que se originaron a partir del primer arco branquial modificado. Las placas podían aparecer fusionadas o bien estar articuladas, presentando una especie de junta entre ellas. El resto del cuerpo generalmente se encontraba recubierto de escamas, aunque algunos especímenes podían carecer de ellas. Los dientes -dos o tres pares- no se parecían a los de los vertebrados actuales, sino que eran proyecciones de las placas óseas que formaban la mandíbula.

Estos peces también se caracterizaban por su morfología aplastada, rematada por una cola en forma de aleta caudal vertical y asimétrica. Por regla general no eran de gran tamaño, rondando los 15 centímetros. Poseían una notocorda con espinas a modo de vértebras, normalmente cartilaginosas, con forma de Y.



Representación del placodermo Coccosteus (Wikimedia, GFDL 1.2)

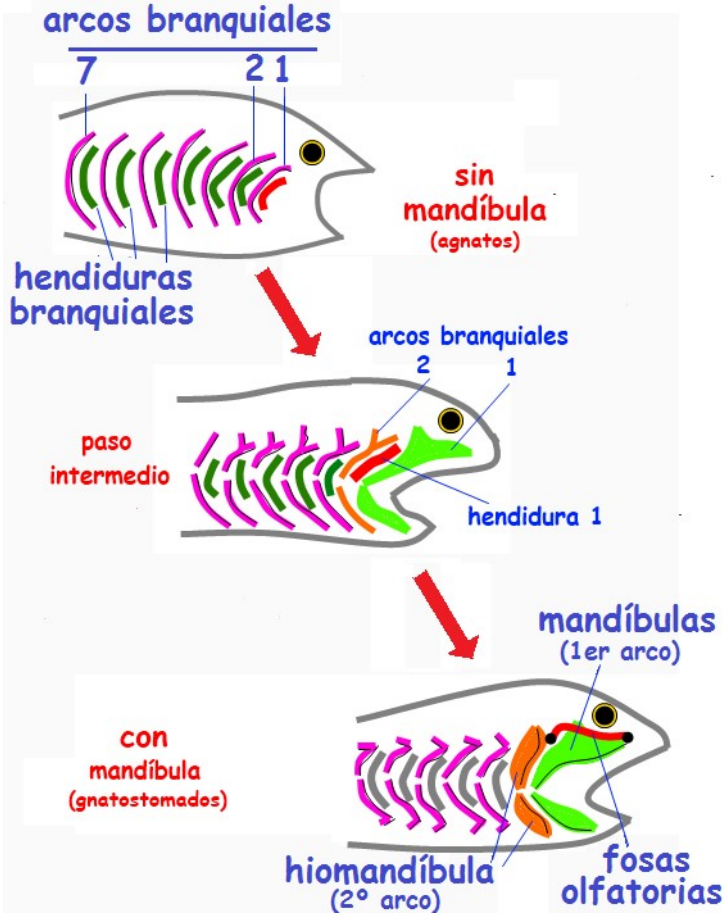
La gran conquista de la época había sido la **mandíbula**. Su aparición fue un logro evolutivo importante, ya que esta nueva herramienta permitía capturar con más facilidad a las presas, siendo usada más tarde en el proceso evolutivo como elemento de sujeción. La primera mandíbula fósil de estructura moderna conocida es la del placodermo *Entelognathus primordiales* encontrado en un territorio que corresponde a la China actual y con una antigüedad de 419 millones de años.

Una de las características distintivas de los cordados es la presencia de unas *hendiduras* a nivel de la faringe, que es la sección del tracto digestivo entre la boca y el esófago, separadas por *arcos branquiales* de tipo óseo. Este carácter está presente en mayor o menor grado en todos los cordados en fase adulta, e incluso manifestándose ya en fase embrionaria, desde los más primitivos, tipo el anfioxo, hasta los vertebrados más especializados.

Inicialmente en estas aberturas se desarrolló un órgano singular compuesto por una cámara con cilios y mucosidad, que originalmente servía para producir una corriente de agua que transportaría micropartículas alimenticias, las cuales eran retenidas por la mucosidad y después transportadas más adentro del canal digestivo.

Este órgano fue poco a poco ampliando sus funciones, ya que a través de él pasaba un agua muy oxigenada, difundiéndose las moléculas de este gas, e incluso de yodo, hacia los vasos sanguíneos de las cada vez más irrigadas delicadas paredes. A medida que los cordados fueron evolucionando y necesitar alimentos de mayor tamaño, este órgano perdió el cometido de función “alimentadora” y en su sustitución se fue aprovechando su capacidad “respiradora”, ampliándose los cilios hacia formas plumosas que pasaron a conformar las branquias de animales como peces o anfibios. Los que desarrollaron la respiración hacia la de tipo pulmonar, abandonando la branquial, según un proceso del que hablaremos más adelante, siguieron aprovechando su capacidad de

absorción de moléculas de yodo para transformarlo en la glándula tiroides, fábrica de hormonas con base en este elemento.



Evolución de arcos y hendiduras branquiales con la formación de la mandíbula y los canales olfativos

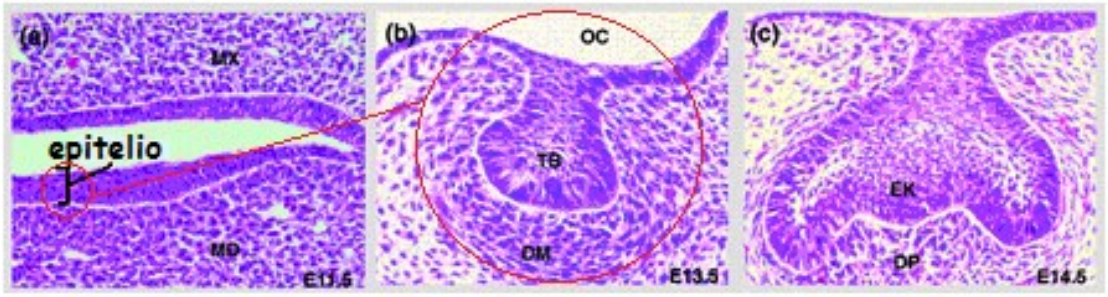
Como hemos mencionado, hubo un momento en que el primer arco branquial y parte del segundo ya no jugaron un papel en el intercambio gaseoso. Así, por ejemplo, en los peces cartilaginosos que son relativamente primitivos, el primer arco branquial se encuentra modificado formando las mandíbulas, mientras el segundo forma parte del apoyo de estas mandíbulas al resto del cráneo. La parte superior de los dos arcos se fusionan, creando una fuerte mandíbula superior, quedando embebida entre ellos la primera hendidura branquial.

Con el paso del tiempo se transformó en un par de tubos abiertos por los dos lados al aparecer los orificios olfativos delanteros y los

traseros, situados estos por detrás de los ojos. Esos tubos se especializarían en percibir "olores": en ellos se encontraban una serie de terminales nerviosas dirigidas por un tipo de genes que son prácticamente idénticos a los que tienen los seres que nos vamos a encontrar en el camino de la evolución (anfibios, reptiles, aves y mamíferos). En cada paso evolutivo podemos ver a estos genes crecer en número, lo que se producía a través de sucesivas duplicaciones de los ancestrales.

Posteriormente a la aparición de la mandíbula emergieron los dientes como excreciones óseas de la piel que la recubría, posiblemente de algo parecido a una escama.[1] Se formaban a partir de una invaginación en las dos capas del tejido cutáneo, derivando una de ellas en una estructura interna con dentina y otra en una externa de esmalte.

Los apéndices dentales aparecen a lo largo de un proceso dirigido por una serie de genes comunes en todos los animales con dientes, que poseen incluso las aves aunque en ellas no se expresen, tales como el *genAMEL* cuya función es la fabricación de la "amelogenina", el más importante componente del esmalte de los dientes, el *gen ENAM* cuya función es la síntesis de "enamelina", otro componente del esmalte o el *gen DSPP* cuya función es la síntesis de la "sialofosfoproteína" de la dentina.



De izquierda a derecha, primeras etapas de la formación de un diente. Las células del epitelio (primera capa) se introducen en el mesénquima (capa situada debajo del epitelio) y forman un "bulbo" desde el cuál se empezará a desarrollar el diente (Peters H & Balling R. 1999. "Teeth: where and how to make them",[2] fair use)

El proceso funciona mediante la colaboración de dos tipos de tejidos distintos. Uno es el epitelial de la boca y otro es el mesenquimal que procede del mesodermo -recordemos que es el tejido intermedio que se genera durante el desarrollo del embrión-.

Dejemos el detalle del nuevo invento y continuemos con el paseo por la biota del Silúrico, que lo habíamos comenzado en el mar. Debemos ahora alejarnos de él y adentrarnos en tierra firme, en donde nos encontramos evidencias de **insectos primitivos**, aún sin alas y sin la fase de metamorfosis. Se tratarían de animales parecidos a los archeognatha o los thysanura, conocidos popularmente como pececillos de cobre y de plata respectivamente. También de esta época están datados los fósiles más antiguos de miriápodos.

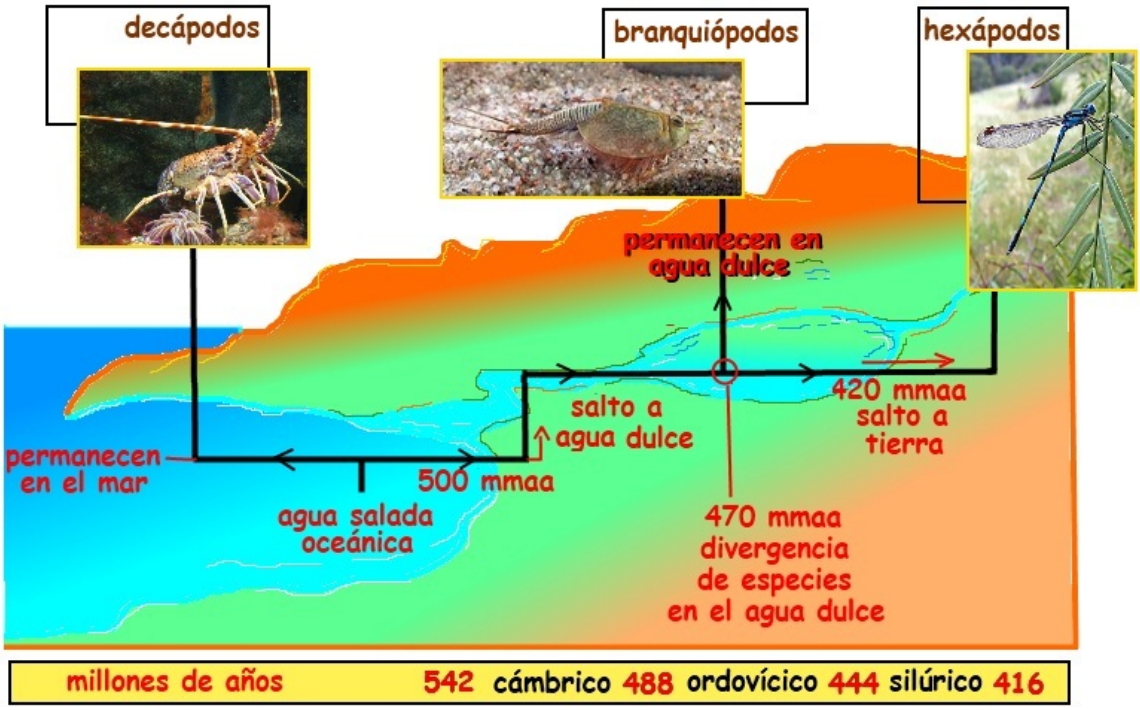


Imagen del pececillo de plata thyasanura Lepisma saccharina (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Sabemos que los hexápodos, entre los que se encuentran los insectos, evolucionaron en agua dulce como una rama de los crustáceos a finales del Silúrico o principios del Devónico, hace unos 420 millones de años. En el agua quedaron los branquiópodos. En la imagen siguiente puede verse el camino de todos ellos.

Como comenta Jesús Espí en su blog Entomoblog,[3] *"la colonización de la tierra por los hexápodos parece coincidir con la de los otros grupos de artrópodos terrestres -miriápodos y quelicerados- a finales del Silúrico. Además, el origen crustáceo de los hexápodos puede solucionar el misterio de por qué los insectos no han sido capaces de extenderse a nichos ecológicos*

marinos y la razón de que los crustáceos apenas hayan colonizado la tierra a pesar de ser un linaje con más de 500 millones de años de antigüedad: en realidad los crustáceos sí colonizaron la tierra, pero en forma de insectos, y como los primeros ya se habían diversificado y ocupado todos los nichos marinos potenciales, esto impidió a los segundos extenderse por el mar. Además, también puede explicar la ausencia de restos de hexápodos marinos en el registro fósil antes del Devónico".



Evolución de los artrópodos y su conquista de la tierra (imágenes de wikimedia, GFDL 1.2 y uso libre)

Las plantas

Las plantas que habían empezado a colonizar la tierra a finales del periodo anterior, el Ordovícico, siguieron extendiéndose por el nuevo nicho.

Las primeras plantas erguidas que aparecen en la tierra carecían de raíces, sistema vascular y hojas, factores que determinaron más tarde el éxito de sus descendientes. Esencialmente estas plantas eran tallos rígidos sencillos. Se han encontrado fragmentos de ellas

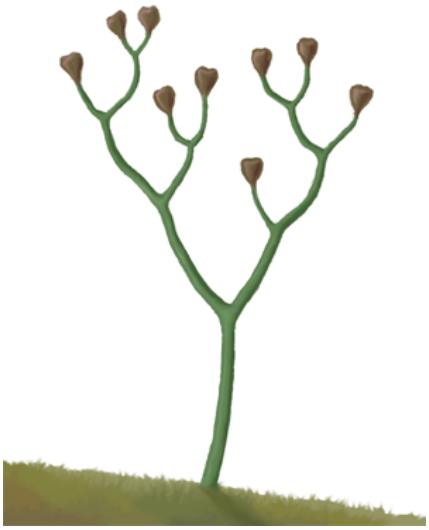
en rocas silúricas, y seguramente fueron las pioneras que vivieron cerca de corrientes o charcas de agua dulce.

En el agua dulce encontraron disuelto el CO_2 que necesitaban, así como fosfatos y nitratos esenciales para la construcción de las moléculas indispensables. Pero provenían del mar, y los citoplasmas de sus células eran una extensión de las aguas saladas, presentando una forma coloidal muy fina de diversos iones y sales, con unas concentraciones mayores que las del agua dulce del nuevo entorno. Simplemente por acción de ósmosis a través de la membrana celular tenderían a absorber agua en su interior, lo que a la larga supondría su destrucción. Su problema fue de qué forma controlar en el agua dulce los líquidos internos de las células. Sabemos que lo consiguieron, siendo seguramente la superación de este condicionante lo que permitió el éxito evolutivo de las células vegetales que fueron favorecidas por la aparición de unas *membranas celulares más gruesas* y resistentes.

Resuelto este problema, el siguiente paso fue ampliar su campo de acción explotando otros ambientes húmedos cíclicos, como charcas estacionales o manantiales que seguían el ciclo hidrológico anual. Al haber endurecido la pared exterior de sus células, las plantas se habían preadaptado para evitar la sequedad del aire y la radiación ultravioleta, pudiendo soportar la estación seca y crecer nuevamente durante la lluviosa. La idea de una pared protectora fue traspasándose poco a poco de las células a la planta completa, desarrollando una *cutícula exterior* que también daba rigidez al conjunto. Pero esta mejora llevaba incorporado un nuevo problema: la planta debía intercambiar con su medio, a través de una pared gruesa, los gases necesarios para el metabolismo de sus células. La solución vino por una especialización adaptativa de alguna de ellas que aprendieron la función de hacer de puerta: cada par de ellas se abría y cerraba dejando un *estoma* por donde la planta podía “respirar” o “excretar”.

Resueltos los problemas, comenzaba una nueva guerra. En la competición entre vecinos saldrían mejor paradas aquellas plantas

que pudieran proyectar mejor a sus células fotosintéticas hacia la luz solar. En los abigarrados tapetes de briofitas de entonces esto sólo se podría conseguir "estirando el cuello", creciendo por encima de las demás. Pero ello conllevó una dificultad añadida: cuanto más se alejaban del húmedo suelo más difícil era el cuidado de las células extremas, a las que había que llevar alimento y de las que había que eliminar los residuos de su metabolismo. Por eso, la primera innovación adaptativa aún antes que la aparición de raíces y hojas fue la invención del *tejido vascular*.



Modelo de Cooksonia (Wikimedia, GFDL 1.2)

El primer registro fósil de **plantas vasculares**, esto es, plantas terrestres con tejidos que transportan los nutrientes, aparece en el período Silúrico. La primera planta vascular conocida es la riniofita *Cooksonia*, del Silúrico superior, hace unos 420 millones de años. Tenía forma de maza de unos 10 centímetros de altura, sin raíces ni hojas. La cabeza era el órgano generador de esporas y los tallos fueron evolucionando a lo largo de los casi 200 millones de años que existieron estas plantas sobre la Tierra: los primeros fósiles no presentan una cutícula exterior ni estomas, por lo que se cree que los intercambios gaseosos que necesitaba se hacían directamente entre sus células y el medio ambiente.

Otras plantas fósiles vasculares del Silúrico fueron los licopodios primitivos, como la *Baragwanathia* de Australia, que aparecen por

primera vez en el registro fósil de finales del Silúrico temprano y que se diversificaron bastante durante el medio y el tardío. Sus rizomas habrían ayudado a estabilizar bancos de arena y limos y zonas de aguas poco profundas.

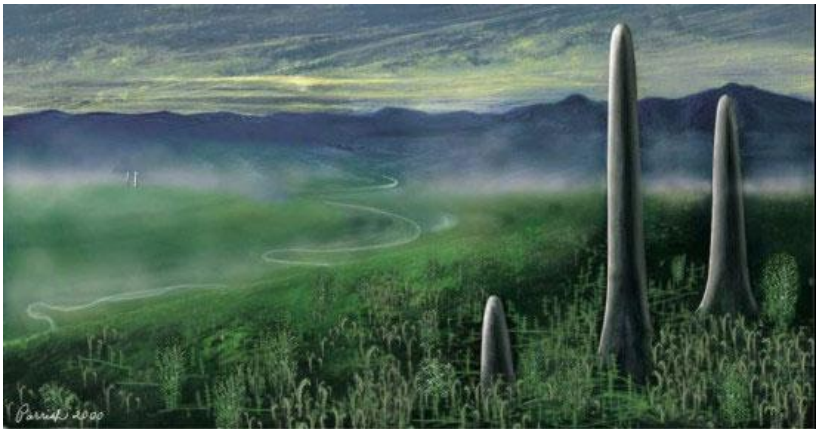


Modelo artificial del licopodio Baragwanathia (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El aumento de la abundancia y la diversidad de los animales que vivían en los estuarios o que se aventuraban remontando corrientes de agua dulce se puede atribuir a aquella progresiva presencia de plantas vasculares en hábitats acuáticos y terrestres que comenzó a finales del Silúrico. Además, la descomposición de su materia habría aumentado la cantidad de alimento disponible en estos nuevos hábitats. Posiblemente esta incipiente abundancia de alimento fue lo que atrajo a algunos artrópodos, tipo miriápodo o hexápodo primitivo, a aventurarse sobre la tierra a finales del Silúrico.

Los hongos

En el Ordovícico, los hongos habían iniciado de la mano de las plantas la colonización de tierra firme. Sus fósiles más antiguos de este periodo, el Silúrico, son de hace unos 443 millones de años. Se tratarían de oomicetos, unos protozoos pseudohongos, asociados a invertebrados marinos y en entornos terrestres hifas -elementos filamentosos subterráneos de los hongos- fósiles de presuntos ascomicetos asociados a pequeños artrópodos.



Paisaje del Silúrico tardío en donde asoman los inmensos carpóforos de los Protaxites (Ilustración: Elsevier/Hueber, NewScientis Environment, ver nota 4 a final de capítulo, fair use)

Se han encontrado [4] también otros fósiles sorprendentes de hongos, datados hace 422 millones de años, que inicialmente se habían asignado a algún tipo de planta, quizás un tronco de conífera. Realmente se trata del carpóforo -la seta- del basidiomiceto *Protaxites*. Su altura llegaba a alcanzar los 8 metros y crecía adoptando una forma parecida a la de un tronco de árbol compuesto por estructuras tubulares concéntricas. Sin lugar a dudas contrastarían en extremo con las pequeñas e incipientes plantas vasculares, como se ha intentado reproducir en el verde paisaje del Silúrico de la imagen anterior.

Según algunos investigadores, ya en esta época estarían presentes los principales grupos fúngicos, aunque curiosamente hay que esperar al inicio del próximo periodo, el Devónico, para encontrar los primeros fósiles de los tipos de hongos más antiguos: los quitridios y los zygomicetos.

Al final del capítulo reproducimos por comodidad la filogenia de los hongos que ya habíamos presentado en el capítulo sobre el periodo Proterozoico.

Con esto damos por finalizada la visita a vista de pájaro del Silúrico, periodo en el que los artrópodos salieron definitivamente del agua al amparo de las cada vez más potentes plantas

vasculares. En los próximos capítulos nos adentraremos en el periodo Devónico, donde no sólo quedaremos admiraremos con las conquistas del Reino de las plantas, sino que seremos espectadores de primera fila de la aventura de los peces poblando definitivamente un nuevo hábitat, el terrestre.



Cronología filogenética de los hongos (De acuerdo con los estudios [5] de Berbee y Taylor (2017), fair use)

NOTAS DEL CAPÍTULO 29:

1. En ésta publicación de septiembre de 2015 aparecida en la revista Science, "*How the enamel that coats your teeth evolved*", Sid Perkins, se habla con detalle de esta hipótesis sobre la aparición de los primeros dientes.
2. Podéis acudir a la publicación de la National Center for Biotechnology Informatio, "*Teeth. Where and how to make them*", H. Peters y R. Balling (febrero 1999).

3. Actualmente el blog Entomoblog de Jesús Espí está inmerso en la plataforma de blogs "*Naukas*".
4. "*Mystery prehistoric fossil verified as giant fungus*", Catherine Brahic. Más información al respecto en esta publicación de la revista New Scientist de abril de 2007.
5. "*Dating divergences in the Fungal Tree of Life: review and new analyses*", John W. Taylor y Mary L. Berbee (enero 2017). El artículo original apareció en la revista Mycologia Volume 98 (2006).

30. El devónico: desarrollo de las plantas

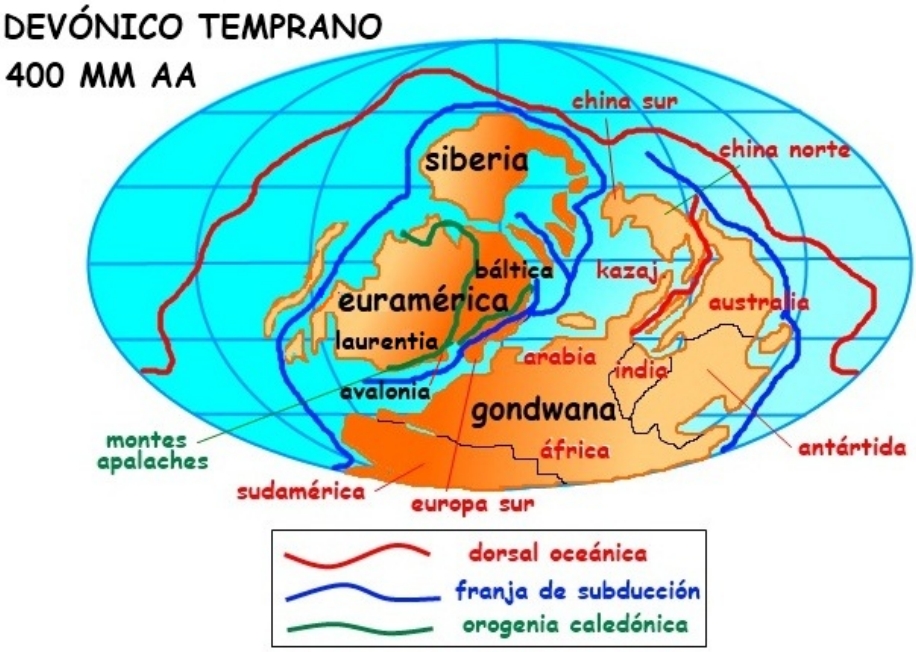
Siguiendo el recorrido cronológico hoy nos toca avanzar hacia un nuevo periodo geológico. En el capítulo anterior nos quedamos en el año 416 millones antes del día de hoy, por lo que ahora nos toca dar un paso más y adentrarnos en el Devónico, que duró hasta hace 359 millones de años. Su nombre procede de Devon, un condado ubicado en la península de Cornualles, en el suroeste de Inglaterra, donde las rocas de este periodo son muy comunes.



A este periodo le podemos poner la etiqueta de "el de las tres migraciones": las plantas se extienden por la tierra llegando a formar enormes bosques; los artrópodos la colonizan fundando la estirpe de insectos y arácnidos; y los peces, después de su evolución en el agua, siguen sus firmes pasos hacia tierra firme.

La configuración de los continentes es aún semejante a la del Silúrico. Gondwana dominando la posición austral mientras Siberia migraba hacia el norte. Entre los dos se consumaba la unión de Laurentia, Báltica y Avalonia que formaron sobre el ecuador el provisional continente de Euramérica. Su posición geográfica le confirió una climatología seca, que se tradujo en unas zonas prácticamente desérticas en donde se formaron los antiguos depósitos sedimentarios de arenisca roja, compuesta por hierro oxidado de color rojo características de las zonas secas. Es por eso

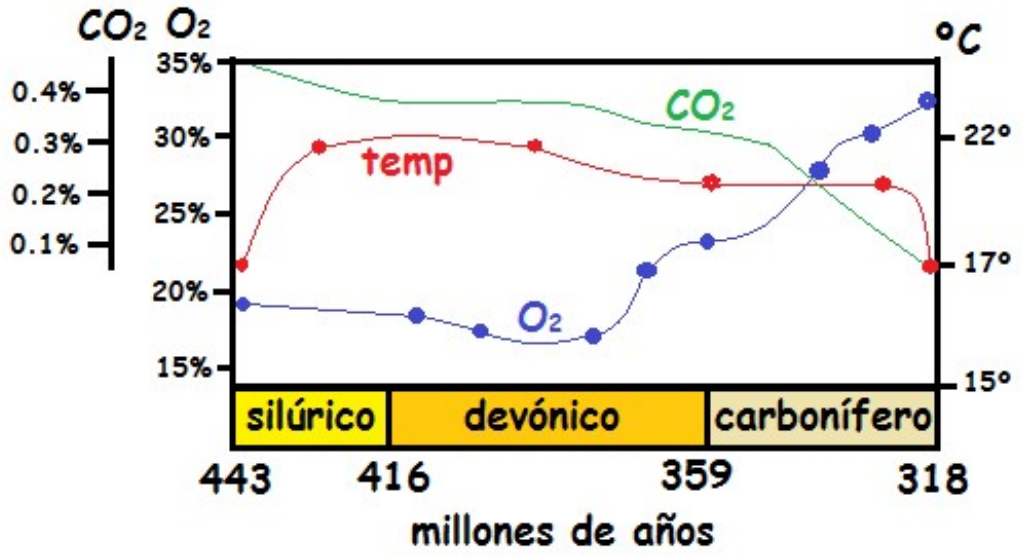
que a Euramérica se le conoce también como el continente de las Viejas Areniscas Rojas.



La orogenia Caledónica completa su estructura y es seguida, al ir cerrándose la proximidad entre Laurasia y Avalonia, por la orogenia Acadia que formó los montes Apalaches, actualmente en la costa este de Estados Unidos.

Poco a poco se iba acercando Gondwana, que empujaba desde su posición sur, hacia Euramérica, firmemente asentado en su posición ecuatorial, haciendo desaparecer progresivamente el océano Rhéico, al sur. Al mismo tiempo la deriva norte de Siberia le dirigía hacia posición de colisión con Euramérica, haciendo cada vez más angosto el océano Ural.

El nivel del mar era elevado en todo el mundo y gran parte de las tierras estaban sumergidas bajo aguas someras donde vivían los organismos de arrecifes tropicales. La intensa actividad de construcción de estos arrecifes indica que el clima devónico fue en general cálido y estable. Sin embargo, la proliferación de las plantas en tierra firme introdujo un nuevo vector en la fotosíntesis, incrementándose la absorción de CO_2 atmosférico y por tanto disminuyendo la capacidad invernadero de la atmósfera.



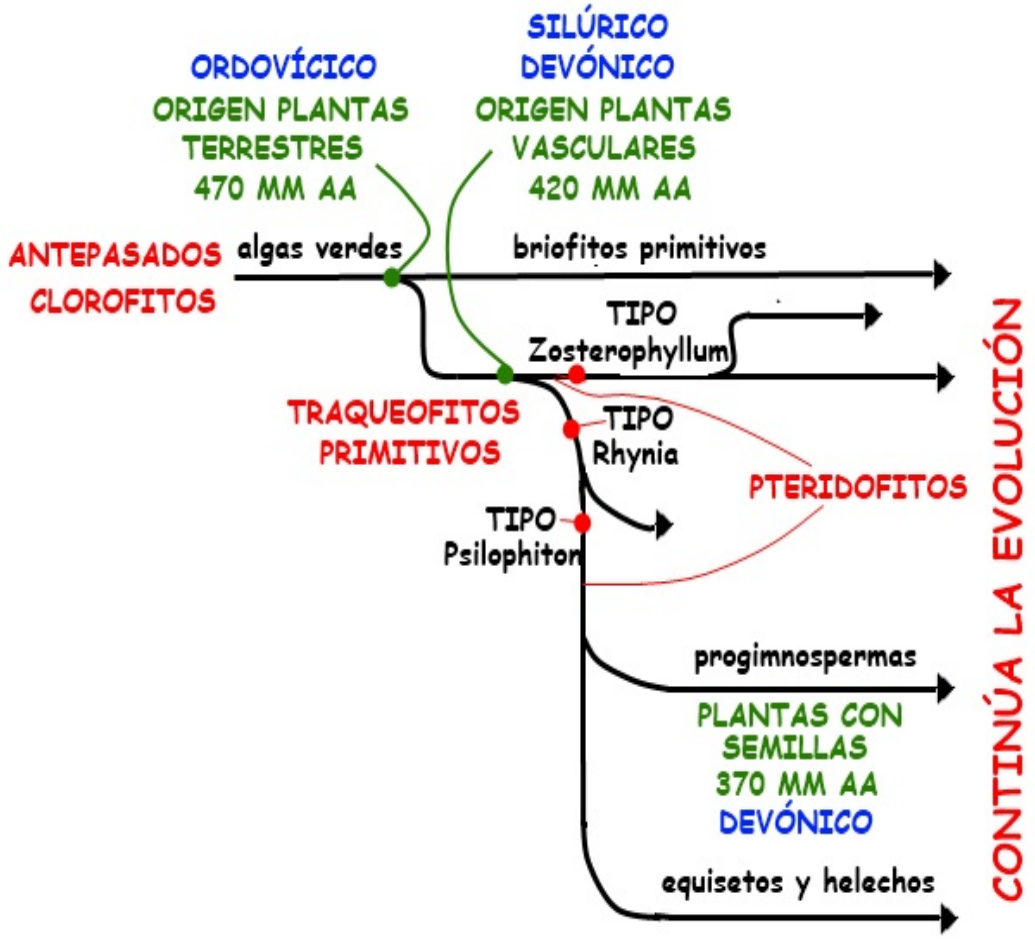
Quizás por ello a finales del Devónico comenzó un progresivo enfriamiento de la Tierra. Como resultado del incremento de la fotosíntesis, en la atmósfera la concentración de oxígeno se incrementó, acercándose a los niveles actuales del 21%.

Las plantas

Durante este periodo el paisaje terrestre cambió drásticamente. La paleta de colores se orientó hacia el verde gracias al desarrollo de las plantas. Dejamos en el Silúrico algunas breves pinceladas próximas a las corrientes y charcas de agua, provocadas por los organismos que se esforzaban en su evolución por conseguir tallos cada vez más altos. Aún no se había descubierto la estrategia de prosperar en horizontal, cosa que harían mucho más tarde las gramíneas en sus inmensas praderas. En el Devónico la tierra firme era la gran oportunidad: hacía tiempo que la capa de ozono se había formado y los rayos ultravioleta no constituían ya ninguna amenaza. La luz del sol se podía tocar ya con las manos, y las plantas fueron a por ella.

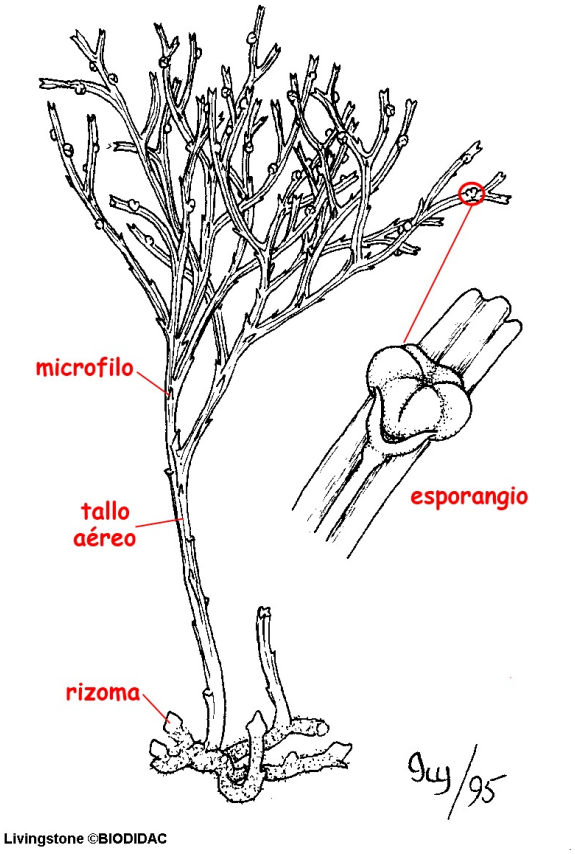
La competencia entre plantas vecinas en busca de la luz obligaba a "bombear" los nutrientes cada vez más alto, por lo que las soluciones que favorecían este bombeo o incluso el intercambio de gases en las alturas fueron las que prosperaban a través de un camino lento pero continuo. Se desarrollaron las plantas vasculares

apoyadas en el perfeccionamiento de los conductos internos y de los estomas superficiales.

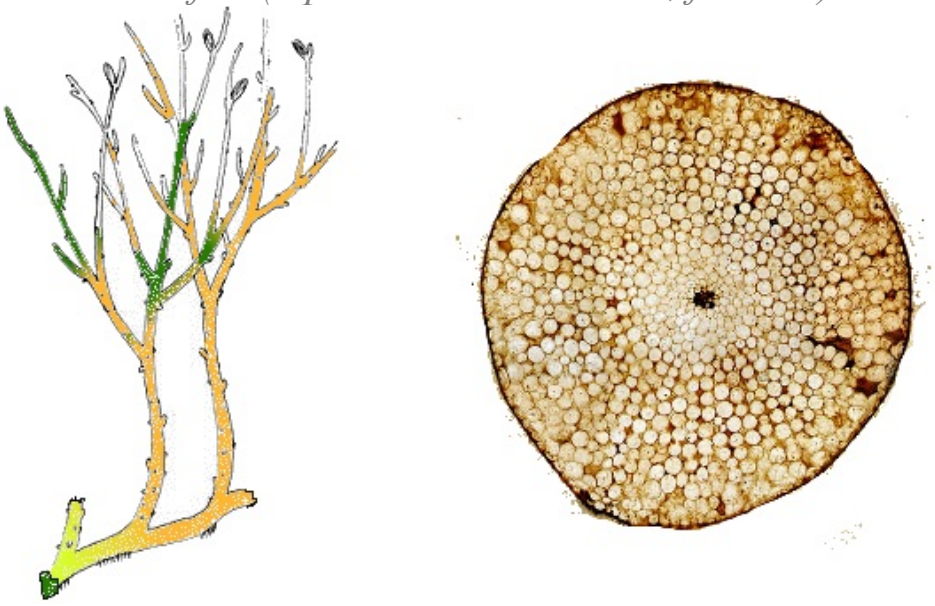


Evolución de las plantas, pasando desde los más ancestrales clorofitos a los traqueofitos, posteriormente a los pteridofitos, para llegar al Devónico

Ya conocimos a la riniafita *Cooksonia* en el Silúrico, con sus esporangios en forma de campanillas al viento, que continuó con éxito a lo largo del Devónico. Podemos considerarla casi la fundadora de la familia de los psilofitos -las plantas "φιτό", desguarnecidas "ψιλός"-. Estas plantas, que alcanzaban una altura de 60 centímetros, carecían de raíces y casi de hojas, las cuales en todo caso eran pequeñas y parecidas a escamas, expansiones de la cutícula de sus ramillas. De todas formas tenían un pie común en forma de un tallo rastrero horizontal de donde partían vástagos ramificados, verticales y verdes.



Psilofito (a partir de BIODIDAC, fair use)



Representación de Rhynia y un corte de su tallo en donde se observan los canales vasculares internos (Wikimedia, GFDL 1.2 y CC BY-SA 2.0 UK: England & Wales)

Otra planta de la misma familia aunque más desarrollada fue la *Rhynia,* de la que se disponen muchas evidencias fósiles. Presentaba unos esporangios más desarrollados y un rizoma bajo tierra que parece ser estaba asociado a algunos hongos. Esta circunstancia hace pensar que en la conquista de la tierra por las plantas tuvo mucho que ver esta relación simbiótica.

Los fósiles que hemos encontrado de finales del Devónico nos muestran restos de troncos y hojas, por lo que podemos imaginarnos grandes extensiones de formas arbóreas y bosques. Esta rápida aparición de variados grupos de plantas y formas de crecimiento se la conoce como la "Explosión Devónica". Y en esta aventura tuvieron parte fundamental la utilización de nuevos polímeros como la **lignina** o la **celulosa**, que surgieron a partir de una pérdida de agua por polisacáridos y que aportaron rigidez, flexibilidad y soporte a estos organismos.

Fue una solución de ingeniería mecánica y de resistencia de materiales que resolvió un problema con la ayuda de estos polímeros, apoyados a su vez por la colaboración de la tensión superficial, que impulsaba el movimiento de líquidos por el interior de los cuerpos de las plantas venciendo a la fuerza de la gravedad.

También aparecieron otros problemas que exigían soluciones, en este caso de ingeniería bioquímica. La "irracional" e ineludible batalla por conseguir ser los primeros en llegar a los rayos de sol llevó al "gigantismo", desde las pequeñas plantas hepáticas a los encumbrados árboles. Era evidente que la mayor altura y complexión debía ser un handicap a la hora de mantenerse erguido, por lo que poco a poco necesitaron enraizarse sólidamente en la tierra. Pero aún más crítico debió ser el que este mayor volumen corporal suponía más necesidad de nutrientes, más necesidades de agua, más necesidades de energía y más necesidades de gases atmosféricos, es decir llevaba consigo un metabolismo más ávido. En una primera instancia, el incremento en los intercambios de las moléculas necesarias para la vida y el mayor aprovechamiento de la luz solar vinieron a través de cambios evolutivos en raíces, hojas

y estomas. Sin embargo, el "gigantismo" iba haciendo su labor callada hacia otra modificación menos perceptible: al crecer la masa corporal su volumen se incrementaba con el cubo del crecimiento, mientras que la sección de las redes tubulares por donde se distribuyen los nutrientes, la sección de tronco y ramas, lo hacía con el cuadrado del crecimiento. El resultado lógico debería haber sido el colapso del metabolismo por las limitaciones de abastecimiento. Pero la realidad nos demuestra lo contrario: el metabolismo no colapsó sino que se atenuó, el organismo aprendió a vivir más relajadamente, más despacio, cosa que sucederá más tarde también con los animales que agigantaron sus formas. Quizás esta circunstancia fue la que provocó en los árboles una mayor longevidad y estabilidad vital.

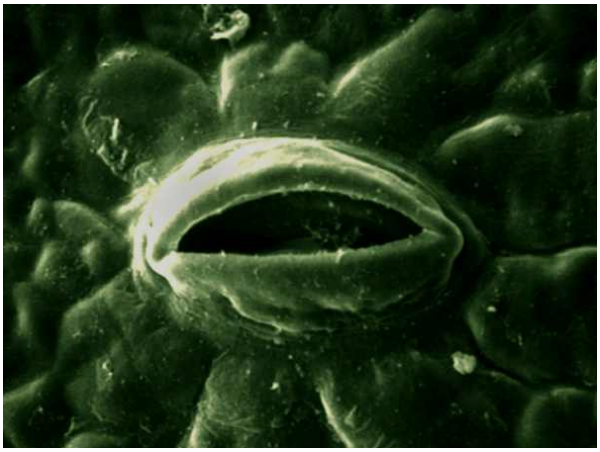
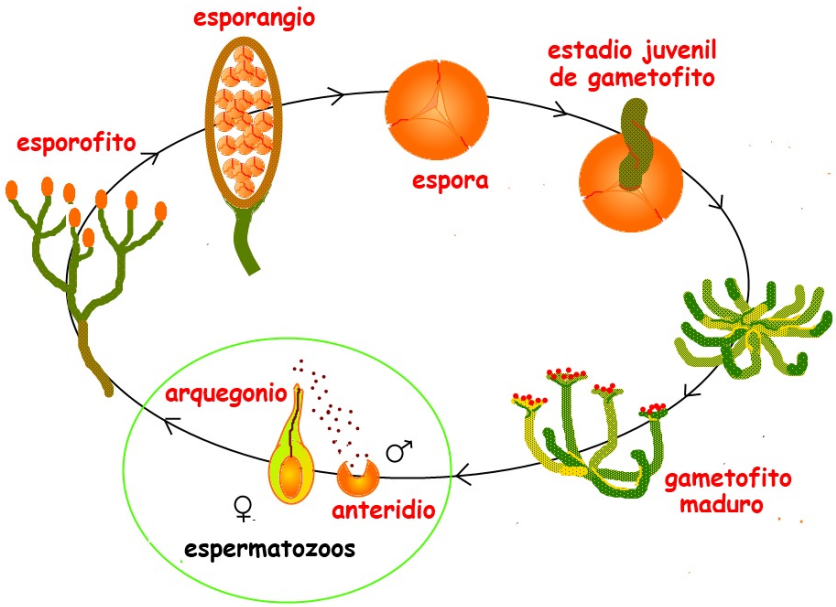


Imagen tomada por un microscopio electrónico de un estoma de una planta (Wikimedia, GFDL 1.2)

Pero con todo lo anterior no se acabaron los problemas que conllevaba la altura. Se planteaban también nuevos retos desde el área de la reproducción. Recordemos que las pequeñas briofitas vivían junto al agua, a su amparo. Y se aprovechaban de esta humedad para que los gametos generados por los tallos masculinos "nadaran" hasta encontrar un tallo femenino, allí ascender y fertilizar el correspondiente óvulo. El resultado sería un nuevo tallo con el esporangio repleto de esporas, embriones con espoleta de retardo. Cuando las esporas estaban maduras se dejaban libres y ahí donde llegaban generaban un nuevo tallo masculino o femenino que cerrarían el ciclo de reproducción. Era un poco complicado,

pero eficaz. En todo este proceso el camino de los gametos masculinos era corto y la vía húmeda ayudaba.



Ciclo reproductor de las Rhynias

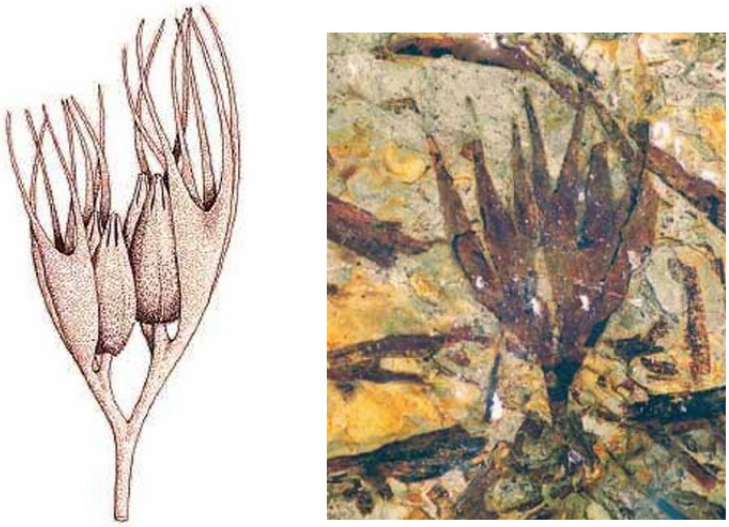
Pero al ir creciendo, esta aventura era como subir en bicicleta al más complicado puerto de montaña. Así que se optó por diferenciar los tamaños: las plantas en su fase generadora de gametos seguirían pequeñas, mientras que en la fase generadora de esporas desarrollarían altura. Pero esto era muy arriesgado en un mundo donde los animales terrestres comenzaban a campar por sus anchas, alimentándose muchas veces con los jugosos tallos verdes donde estaban las células sexuales. Así que la naturaleza seleccionó otro camino de éxito uniendo la fase sexuada y la asexuada, quedando los pequeños gametofitos incrustados en el alto esporangio: **iban a llegar las plantas con semilla**.

El proceso de transición fue progresivo, partiendo de unas plantas, como los musgos, en las que la fase haploide, de gametos masculinos y femeninos, era la más persistente mientras que la diploide, de embriones –esporas- la más corta en el tiempo.

Se pasó después a otro tipo de plantas en las que las dos fases no eran claramente discernibles, se alternaban las generaciones de

gametofitos dominantes con las de esporofitos dominantes. Le siguió una época de incertidumbre que culminó con la aparición de las plantas con semilla, en las que los gametofitos son residuales. Así en las gimnospermas, que triunfarán en el Carbonífero, los gametofitos son parte del esporofito o semilla, y en las más evolucionadas plantas con flor, las angiospermas del Cretácico, los gametofitos son unas simples células, siendo la triunfadora el esporofito que ya no es tal sino una semilla.

La semilla es un embrión equivalente a una espora joven, con un tejido nutritivo asociado rodeado de una cubierta de protección. A fin de cuentas se asemeja a algo así como a un huevo animal fecundado que hubiera quedado en estado latente, a la espera de condiciones favorables para iniciar la germinación y desarrollo.



A la izquierda Archaeosperma arnoldii y a la derecha Elkinsia polymorpha (Imagen: Pettitt & Beck, 1968, CNRS, y Jardín Botánico de Córdoba, fair use)

Pero en realidad las plantas con semilla son patrimonio del siguiente periodo, el Carbonífero, así que vayamos a los verdaderos reyes del Devónico.

Ya hemos hablado de las riniafitas. Podemos hablar también de los licopodiofitos -que se desarrollarían en todo su esplendor durante el siguiente periodo, el Carbonífero-, de los pteridofitos ancestros

de los helechos, de los que hay una gran evidencia fósil de sus troncos y hojas, o de las progimnospermas antecesoras de las modernas plantas con semilla, cuyo espécimen mejor conocido es el *Archaeopteris*, con 20 o 30 metros de altura, un árbol fósil con hojas de tipo helecho encontrado en todo el mundo desde el Devónico Superior al Carbonífero Inferior. No hay que confundir a este árbol con el *Archaeopteryx,* un animal considerado la primera ave, al cual visitaremos en el correspondiente capítulo.



Representación y fósil de Archaeopteris hibernica (Imagen: Dennis C. Murphy, fair use, y wikimedia, dominio público)

Las primeras plantas con semillas datan de hace unos 370 millones de años. El fósil más antiguo que se conoce de este grupo es *Elkinsia polymorpha* y consiste en unas ramitas con semillas. Otro fósil un poco posterior es *Archaeosperma arnoldii,* en el que se ven cuatro óvulos rodeados por unos apéndices alargados que constituyen una especie de cúpula. Estos antecesores presentaban las semillas directamente sobre las ramas, y no disponían de estructuras especializadas a su alrededor: nada que se pareciese a una flor.

En un lugar próximo a Nueva York, con una historia que data de hace 380 millones de años, se encuentra el yacimiento de Gilboa. En él se han podido observar restos muy completos de un bosque

que se había desarrollado en una región costera pantanosa inundada, con clima tropical, llena de grandes *Eospermatopteris* que recuerdan en la forma al bambú actual -aunque no está emparentado-, y con un sistema de raíces poco profundo que se extendía en todas direcciones. Ello favorecía el arraigo de otras plantas, como los *Aneurophytaleans*, que poblaban los suelos del bosque como los modernos helechos, formando una asociación ecobiológica con el resto de árboles, en cuyas espesas redes de raíces se apoyaban para trepar hasta el dosel del bosque de manera similar a como lo hacen algunas lianas tropicales en la actualidad.



Reconstrucción de cómo era el bosque devónico de Gilboa con los altos Eospermatopteris y las trepadoras Aneurophytaleans. En la esquina inferior izquierda asoma una Lycopsida (Ilustración: Frank Mannolini, New York State Museum, fair use)

En el mismo emplazamiento se han encontrado ejemplares arborescentes de *Lycopsida*, aunque son menos abundantes que las dos especies anteriormente mencionadas. Tenían unos troncos de 11 centímetros de grosor y 4 metros de altura. Estos vegetales

constituyen un grupo muy antiguo de plantas vasculares sin semilla que están emparentados con los modernos licopodios. Más tarde, durante el Carbonífero, estas plantas contribuirían a la formación de abundantes masas de carbón.

Los árboles caducifolios producirían cantidades considerables de hojas que al pudrirse debían generar unos detritos muy nutritivos. El nuevo escenario provocado por este tipo de plantas tuvo que introducir muchas oportunidades en el desarrollo de la biosfera. Por un lado, se incrementaban las fuentes de alimentación utilizables por los organismos heterótrofos, minúsculos artrópodos y hongos. Por otro lado, aparecían otros y variados beneficios, como que la cobertura arbórea preservara de las radiaciones solares ampliándose así los ambientes húmedos, o como que el ambiente creado suponía una oportunidad para ocultarse a la vista de otros animales, ya fueran predadores o predados. Todo ello favoreció e impulsó la coevolución entre animales y plantas, entre otras la relación alimentación/transmisión de esporas/semillas. Se había abierto un inmenso nicho nuevo del que rápidamente se aprovechó la Vida. El potente océano dejó definitivamente de ser la única cuna para los organismos vivos.

Los hongos

En el yacimiento escocés de Rhynie Chert, datado en hace 410 millones de años, posee un registro fósil de hongos, en particular los más antiguos del grupo de los quitridios y de los zygomicetos -416 millones de años-. En este yacimiento se han localizado ejemplares de hongos parásitos de plantas, de forma que se pueden observar especímenes de vegetales colonizados por hifas de hongo. También muchos ejemplares presentan relaciones de saprofitismo (modalidad de nutrición a partir de los restos de otros organismos) similares a las actuales. Existen también ejemplos de hongos parásitos de otros hongos. Asimismo se ha encontrado un hongo que formaba micorrizas en las raíces aéreas y subterráneas de las plantas, como también a varios hongos zygomicetos asociados a cianobacterias en estructuras similares a líquenes. Es decir,

parasitismo, saprofitismo, simbiosis de tipo liquen o microrriza… el abanico completo de la ecología fúngica actual existía ya hace más de 400 millones de años.

Vamos a dejar a los hongos en un paisaje que realmente había cambiado drásticamente a lo largo de este periodo. La tierra estaba repleta de plantas, desde las más humildes junto a los arroyos hasta las que formaban majestuosos bosques de árboles con una copa tipo palmera y hojas como helechos. Las tierras estaban asentándose gracias a sus raíces. Por debajo de estos colosos ya no sólo se oía el rumor de las aguas o el deslizarse del polvo movido por el viento, sino que de vez en cuando parece escucharse un ligero crepitar de hojas secas, un balanceo de una ramita, un tímido avanzar de un insecto, atento a conseguir comida y no ser comido. Le gusta la materia vegetal y a lo mejor confiaba en que los hongos empezaran la fermentación para aligerar su digestión. Era de esperar que los primeros hexápodos que en los mares ramoneaban algas, al salir del agua siguieran con sus hábitos alimenticios. Pero no estaban solos. Al igual que sucedía en las pantanosas costas, otros artrópodos, como pudieron ser los escorpiones marinos, les seguían la pista. El silencio tenía las horas contadas, la lucha por la vida se encargó de ello: una araña *Trigonotarbid*, tras una espera paciente, acababa de enrollar en sus sedas a un pequeño insecto *Rhyniella.* Debía alimentar a sus crías y no temía a nadie en tierra. Pero no sabía que también su época de dominio tenía los días contados…

Aunque las aventuras de los insectos es otra historia. Y la vamos a contar en el capítulo siguiente, en la que también nos adentraremos en la vida de uno de sus principales predadores y actores del Devónico: los peces.

31. El devónico: la edad de los peces

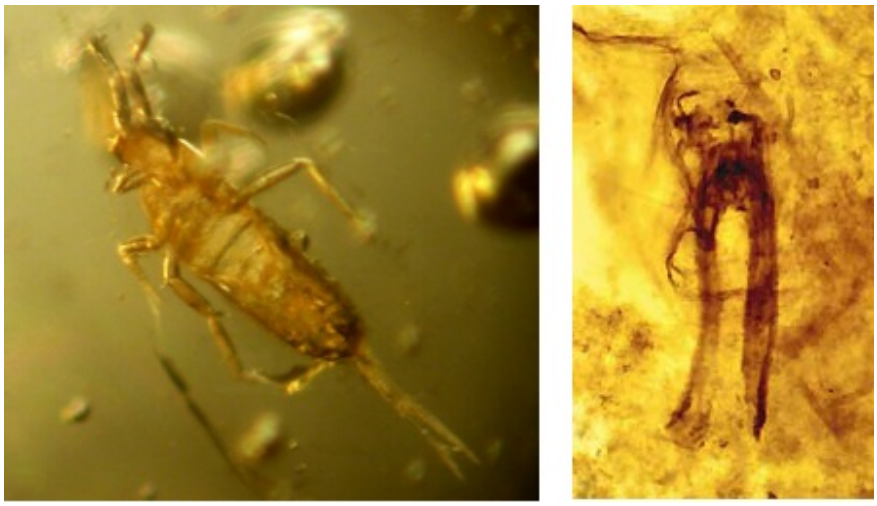
En el capítulo anterior nos adentramos en el Devónico, periodo que duró desde hace 416 a 359 millones de años. Hablamos sucintamente sobre su geografía, geología y climatología, marco en donde se desplegó la evolución de las plantas que conquistaron definitivamente las alturas gracias a innumerables nuevas tretas y estrategias. Vimos que les acompañaban los hongos, que ya por entonces practicaban los métodos actuales de interrelación con ellas.

En el capítulo que iniciamos vamos a continuar con la biota de este periodo geológico adentrándonos en el mundo de los animales. Nos asomaremos también a lo que sabemos de los insectos del Devónico, así como en la intensa historia evolutiva de los peces.

Al igual que sucedió con la colonización de las plantas, en un principio la tierra firme supuso una doble oportunidad para los pequeños artrópodos marinos. Huyendo de la predación brutal que dominaba las aguas del mar habían migrado ya a zonas de aguas poco profundas y charcas, remontando posiblemente ríos y torrentes. El huir hacia la tierra suponía poder huir de aquellas amenazas. Por otro lado, ya hemos hablado en el capítulo anterior de la cantidad de desechos vegetales que se generarían en los bosques del Devónico, que podían ser aprovechados por los pequeños animales detritívoros como los milpiés, sus primos los gigantes *Arthropleura*, los ácaros y los hexápodos colémbolos. La tierra era un gran almacén de comida para el primero que llegara. Y así no fue difícil que la migración de los artrópodos prosperara. ¿Cuándo se debió producir?

Al dejar hace dos capítulos al periodo Silúrico ya teníamos la intuición de que en aquel momento algún artrópodo había empezado ya a abandonar el agua. Sin embargo, los primeros datos

fósiles que permiten asegurar esta realidad provienen de un yacimiento paleontológico datado en hace aproximadamente 410 millones de años, localizado en el yacimiento de Rhynie Chert, en los alrededores de la ciudad escocesa del mismo nombre. Hablábamos de él en el capítulo anterior al estudiar los fósiles de hongos. En dicha formación aparecen artrópodos terrestres que incluyen escorpiones, pseudoescorpiones, ácaros e insectos con alas, los cuales debieron evolucionar independientemente unos de otros hacia sistemas de respiración aérea.



Fósiles conservados en ámbar de Rhyniella y de Rhyniognatha (www.fossilmuseum.net y www.evolution-textbook.org, fair use)

En el yacimiento escocés destacan los fósiles de los primeros **hexápodos** conocidos en tierra firme, el colémbolo *Rhyniella praecursor* y el insecto *Rhyniognatha hirsti*. Datan de principios del período Devónico, hace entre 411 y 407 millones de años, aunque es probable que aparecieran antes, a finales del Silúrico. En el primero de ellos ya se encuentran definidas las estructuras de todos los insectos: cuerpo dividido en cabeza, tórax y abdomen, tres pares de patas y un par de antenas. Del segundo sólo se han encontrado los restos de sus mandíbulas que sugieren que pertenecían a un insecto alado, con lo que el origen del vuelo de los insectos habría ocurrido al menos 80 millones de años antes

de lo que se pensaba, ya que los primeros fósiles de alas de insectos datan de finales del Carbonífero.

Si seguimos ahora la pista de los **arácnidos** encontramos que los más ancestrales provenían ya del Silúrico y fueron los del orden *trigonotárbida*. Realmente eran unos pseudoarácnidos de una rama lateral, sin representantes en la actualidad. Tenían ya ocho patas, y pulmones en libro, pero no fabricaban seda. Las arañas propiamente dichas evolucionaron un poco más tarde, hace aproximadamente 400 millones de años, en pleno Devónico. Tenían segmentación abdominal y órganos que secretaban seda. El fósil más antiguo encontrado de una especie de estas características data de hace 380 millones de años y se conoce como *Attercopus fimbriungus*.



Fósiles de arácnidos del Devónico, el trigonotárbida Kreischeria y Attercopus fimbriungus (Wikimedia, CC BY 2.0 Generic y Smithsonian.com, fair use)

Dentro de la clase de los arácnidos se encuentran también los escorpiones, primos de las arañas. Sabemos que en el Silúrico eran animales marinos que respiraban por branquias y debían estar adaptados a condiciones costeras. En el Devónico dieron también el salto a tierra firme, desarrollando también unos pulmones en libro y una débil coraza quitinosa. Por desgracia, muy raramente dejaron restos fósiles, por lo que se sabe muy poco de su evolución. Para ello habrá que esperar al Carbonífero.

Pero resultó que en nuestra historia el éxodo de la Vida hacia nuevas oportunidades no acabó con la aventura migratoria de los artrópodos. También los peces encontraron motivaciones muy parecidas. Las aguas del Devónico eran aguas de predación y supervivencia, y la tierra estaba llena de oportunidades, repleta de suculentas plantas, nutritivos insectos y abundancia del supereficaz oxígeno. Aunque antes tuvieron, eso sí, que pasar por una serie de múltiples conquistas.

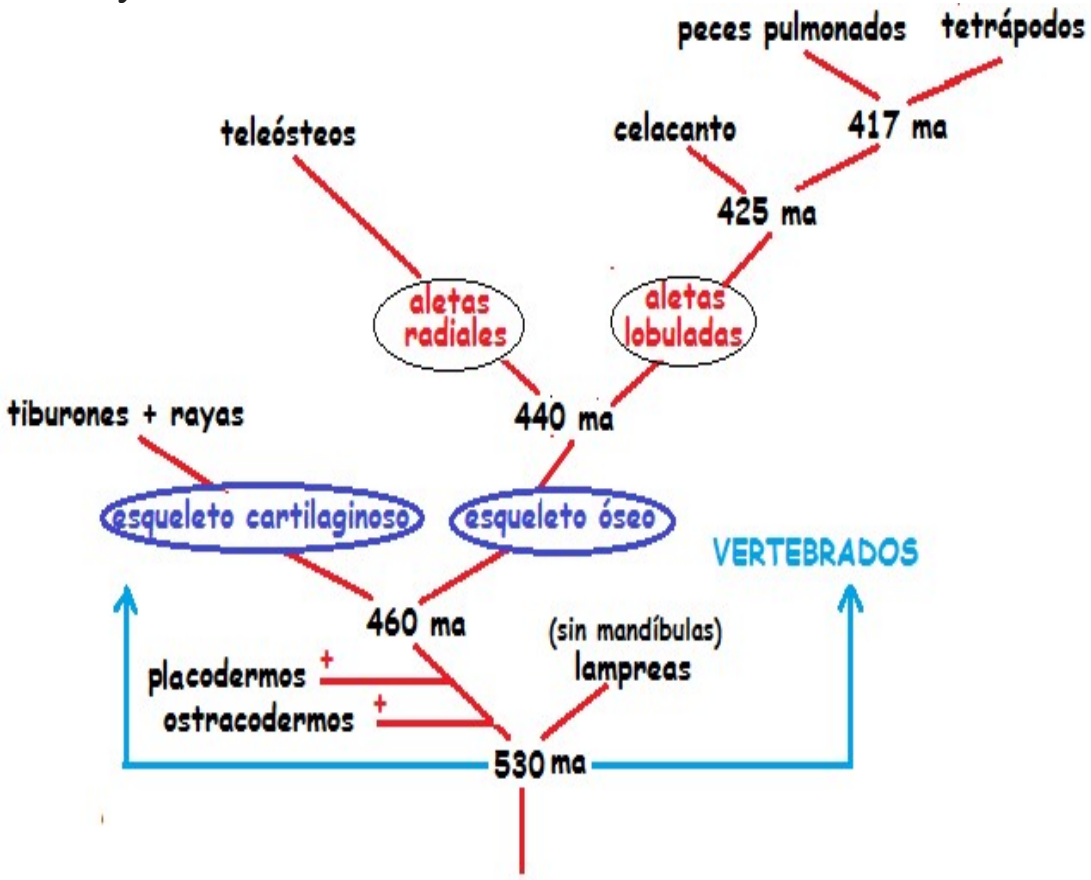
El preámbulo empezó en el mar de la Edad de los Peces

Los mares del Devónico eran muy semejantes a los del Silúrico, las aguas poco profundas seguían favoreciendo el desarrollo de los arrecifes en donde corales, algas y esponjas colaboraban con precisión. La pequeña vida marina se encontraba segura en estos medios, y por eso proliferó durante el Devónico. Los moluscos bivalvos se extendieron hacia aguas dulces, mientras los cefalópodos se decantaban hacia formas de caracol, tipo amonites, abandonando las formas rectas tipo ortocono. Entre los artrópodos, los trilobites parecían perder su carrera armamentística, lo que hizo disminuir mucho a sus poblaciones en contraste con lo que les pasaba a los escorpiones marinos, causantes en parte de la fatalidad de los trilobites.

Pero el gran cambio se dio en los animales cordados nadadores, entre los cuales aparecieron nuevos fenotipos, todos ellos predadores. Es el periodo de la expansión de los peces, y no sólo por sus nuevas formas, sino también porque por primera vez remontaron las corrientes fluviales y se establecieron en lagos y ríos. El cambio del agua salada a dulce debió ser tan arduo como el que habían experimentado antes las plantas al colonizar la tierra. Se debieron utilizar trucos parecidos, como endurecer el epitelio externo con escamas y pieles más impermeables.

En el esquema siguiente se ve el árbol filogenético correspondiente a los peces durante la edad en que se inició su gran diversificación y expansión. Las fechas corresponden al comienzo de la

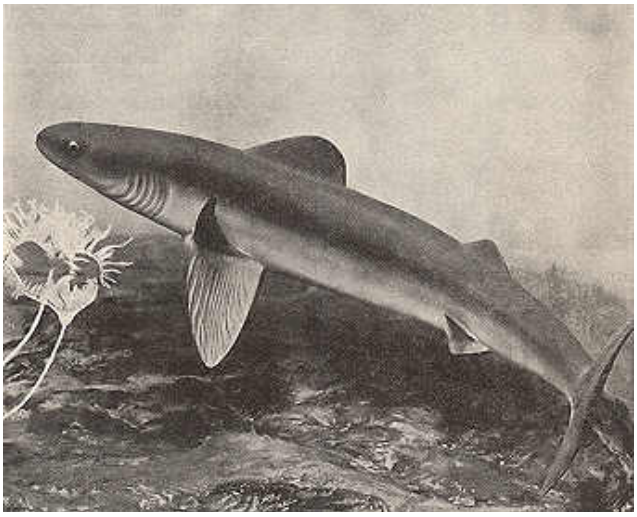
ramificación inicial del grupo, no hay que confundirlas con la época en que los especímenes se habían ya consolidado, y por tanto no coinciden las fechas con las de las edades geológicas del Silúrico y Devónico.



Diversificación de los peces durante el Silúrico y Devónico

Del Silúrico venían los ostracodermos, peces sin mandíbulas, los falsos tiburones ya con mandíbula y los primeros placodermos.

Estos peces debían tener un esqueleto cartilaginoso, a pesar de las duras placas que cubrían sus cuerpos. Este tipo de material, el cartílago, debió aparecer por primera vez como elemento estructural del esqueleto hace unos 400 millones de años, con la aparición de los peces condríctios, que literalmente quiere decir precisamente eso, “pez cartilaginoso”. Los actuales descendientes de aquellos peces son los tiburones y rayas y, como ellos, sus tatarabuelos eran consumados predadores. Los fósiles más primitivos que se conocen corresponden al género *Cladoselache*.



Cladoselache (Wikimedia, dominio público)



Placas y dientes del Dunkleosteus (Wikimedia, dominio público)

Los ostracodermos fueron desapareciendo a lo largo del Ordovícico. Lo mismo les sucedió a los placodermos. Entre los más conocidos de estos últimos está el *Dunkleosteus,* de finales del periodo. Se caracterizaba por una cabeza acorazada, con placas de cinco centímetros de grosor, provista de mandíbulas con cuchillas dentales poco usuales. Aunque otros placodermos rivalizaban con él en tamaño, *Dunkleosteus* es considerado uno de los depredadores marinos más fieros y mortales que hayan existido. Con seis metros de largo y una tonelada de peso, este cazador estuvo en la cúspide de la cadena alimentaria y probablemente depredaba toda clase de fauna.

Una investigación [1] reportada en 2008 han verificado un inesperado detalle de los placodermos: algunos especímenes copulaban y las madres desarrollaban los embriones en su interior, lo cual es un antecedente clarísimo de las estrategias reproductivas de los actuales tiburones, rayas, celacantos y algún que otro teleósteo. Un grupo dirigido por el paleontólogo australiano John A. Long, encontraron dos embriones de peces artrodiros, el grupo más diverso de los placodermos, con más de 200 especies, en el interior de especímenes fosilizados de 380 millones de años de antigüedad. Era la primera evidencia clara de reproducción mediante fertilización interna en este grupo tan diverso. Una de las características más curiosas del fósil es que en su interior encontraron un embrión fosilizado de placodermo unido a su madre por un cordón umbilical. Hasta entonces se creía que las criaturas de ese período se reproducían de forma ovípara, mediante la fertilización de las huevas fuera del cuerpo de la hembra. Pero aún había más. Long y su equipo encontraron en los fósiles estudiados estructuras en la aleta pélvica indicativas de que los placodermos se apareaban mediante unos lóbulos situados en la aleta del macho, incipientes penes parecidos a los de los tiburones modernos.

Dejemos a los **elasmobránquios**, los peces cartilaginosos, y sus costumbres. Sus antepasados continuaron el camino sin percatarse de que en un momento dado, hace unos 460 millones de años, algo estaba revolucionando el mundo de los materiales estructurales orgánicos. Un ancestro suyo, probablemente un pequeño pez con pinta de tiburón y mandíbulas, tuvo una "enfermedad": se le osificaban los cartílagos. El error no fue anulado por la naturaleza, puesto que debió tener una influencia neutral en sus poseedores. Al menos daba las mismas oportunidades que el tener un esqueleto dúctil y blando: la misma potencia natatoria, la misma agilidad, la misma capacidad de ir a por las presas. Serán a partir de este momento los **osteictios**.

En 2014 se publicó [2] el resultado de un estudio genómico sobre el pez *Callorhinchus mili*, el "tiburón elefante" al que se le considera un fósil viviente, aún más que el celacanto, por el que se han

podido determinar los genes que provocaron tal digresión evolutiva, pasar de cartílago a tejido óseo.

Con los osteictios radió del árbol común la rama de los peces óseos que con el tiempo fueron especializando sus apéndices. Unos siguieron con la idea de aletas con livianos *radios*, cada uno de ellos una fina barra cartilaginosa u ósea, perfeccionándolas y motorizándolas con músculos en el interior del cuerpo: un gran avance tecnológico que dio luz a los *actinopterigios*, los "aletas de radios". Otros, los *sarcopterigios* o "aletas de carne", las deformaron como una especie de "brazos" carnosos, *lobulados*, motorizados por músculos internos de los lóbulos que estaban engarzados alrededor de un "hueso" central. Los peces con aletas radiales posteriormente formaron la gran familia de los teleósteos, compuesta por la mayoría de los peces actuales, mientras que los peces con aletas lobuladas darán paso a los celacantos, a los peces pulmonados… y a los anfibios.



Ejemplos de aletas, arriba, lobulada, de un pez sarcopterigio y abajo, radial, de un ciprínido (Wikimed, GFDL 1.2/ CC BY-SA 2.5)

Las **aletas** eran los controles de su movimiento por el agua. Cada una de ellas estaba especializada según fuera la función que desarrollaba en el complejo sistema de equilibrio y dirección natatorio. La *aleta dorsal* les mantenía verticales, el ***par de aletas***

ventrales y la *anal* estabilizaban su movimiento. El impulso y dirección lo ejercían con el fuerte penduleo horizontal de la *aleta caudal* y el freno mediante el ***par de aletas pectorales*** junto a las aberturas branquiales. En el anterior texto se ha resaltado con negritas las aletas pares que en el futuro se transformarán en las cuatro extremidades de los tetrápodos. Somos cuadrúpedos gracias a una solución de estabilidad hidrodinámica, ¿quién lo diría? Pero esto es otra historia diferente a la de la navegabilidad de los peces. Esta navegabilidad se refinó mediante un nuevo órgano especial.

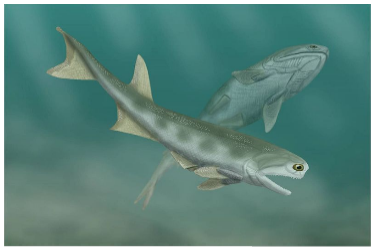
La mayoría de los peces con esqueleto óseo poseían ya **vejiga natatoria** lo que les daba una gran versatilidad a la hora de nadar. Los tiburones, al contrario, como no la tienen, no pueden dejar de nadar para no caer a las profundidades, en una continua corrección contra la fuerza de la gravedad. De ahí que lo compensen con una gran agilidad y fuerza en sus movimientos.

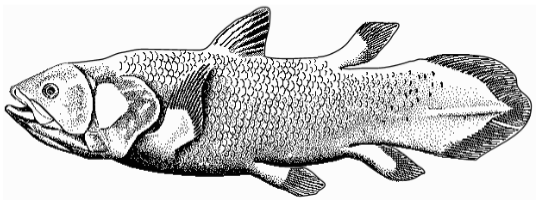
La vejiga natatoria es un saco lleno de gas, que se forma en estado embrionario, con el que los peces óseos controlan la flotabilidad mediante un complejo sistema de intercambio gaseoso con la sangre y permite al pez ascender, descender o permanecer a un nivel estable en el agua sin necesidad de utilizar la musculatura.[3] Su origen está en la evolución de un saco ciego de la faringe en donde posiblemente almacenaba aire absorbido por la boca para complementar el intercambio branquial de oxígeno. Aunque parezca algo contrario a lo esperado, de la vejiga natatoria no derivaron más tarde los pulmones. Para decir eso nos apoyamos en el desarrollo embrionario de los actuales peces pulmonados. Puede observarse que sus pulmones funcionales son una derivación de la pared ventral del final de la faringe, mientras que el saco ciego del que deriva la vejiga natatoria es una extensión de la pared dorsal.

De esta época es el fósil de un pez de aletas lobuladas, *Kenichthys campbelli*, de 395 millones de años de antigüedad, descubierto en la provincia china de Yuan. Presenta unos conductos nasales que se abren en la bóveda de la boca en mitad del arco de sus dientes

superiores, casi como si tuviera un paladar partido. Se habían formado por migración de los nostriles posteriores –unos orificios junto a los ojos- inicialmente externos, hacia el interior de la boca: es la evidencia del primer paso para la formación de unos conductos nasales separados del tubo digestivo que tan buena ayuda supondrá a los vertebrados en el nuevo mundo terrestre aún no conquistado, ya que gracias a ellos podían "tragar" oxígeno en una posición de aguas someras sin necesidad de que su cuerpo sobresaliera mucho del agua.

Nos hemos adelantado demasiado hablando de los peces pulmonados, así que retomaremos el sendero siguiendo la pista de los peces con esqueleto óseo. Entre los más antiguos del tipo de aletas radiales se encuentra el *Cheirolepis,* que fue un predador de agua dulce de unos 55 centímetros de longitud. Más tarde evolucionaron los peces de aletas lobuladas, primero los celacantos que sobreviven hoy en día, y con posterioridad los peces pulmonados. El éxito de estos últimos se debe a su capacidad para retener aire en los pulmones en los períodos de desecación ambiental, moldeados por la selección natural en sus hábitats preferidos, las acumulaciones de agua dulce superficiales. Los celacantos, por el contrario, optaron por las profundidades de los océanos.





Arriba imagen artística del pez de aletas radiadas Cheirolepis y abajo celacanto Latimeria Chalumnae (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unporte y GFDL 1.2)

Con todas las armas para el asalto terrestre

Con los peces pulmonados de aletas lobuladas hemos llegado al último diseño que se necesitó para que estos animales pudieran aventurarse con garantías mínimas fuera del agua. La aventura de los artrópodos había sido difícil: las patas articuladas, el aligeramiento de sus caparazones, el paso de la respiración branquial a la pulmonar… pero nada comparado con la complicada vía de los vertebrados hacia la protectora tierra, hacia un mundo aéreo lleno de oxígeno y oportunidades. Sólo había que aprender.

Y no eran pocas las dificultades. Había que aprender a andar con unas patas inventadas; había que aprender a respirar directamente el oxígeno atmosférico; había que luchar contra la gravedad, antes casi imperceptible en la ingravidez "arquimedeana" de las aguas, fortaleciendo el esqueleto; había que conseguir, por meros motivos de supervivencia, un cuello flexible que permitiera levantar la cabeza y asomar sólo los ojos por encima de la protectora lámina de agua; había que cambiar la flexibilidad corporal y pasar de un bandeo lateral como lo hacían los peces a un bandeo arriba/abajo; había que fortalecer la piel que ya nunca más estaría permanentemente lubricada por el agua, al igual que sus huevos, que deberían aguantar la sequedad de tierra firme. Todo ello, si querían realmente colonizar el nuevo mundo.

Impresionante. De todo ello disfrutaremos en el capítulo siguiente.

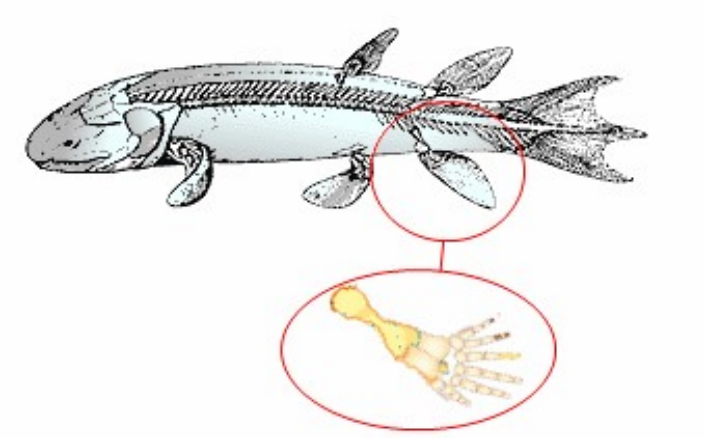
NOTAS DEL CAPÍTULO 31:

1. "*Live birth in the Devonian period*", John A. Long et al., publicada en la revista Nature de abril de 2008.
2. "*Elephant shark genome provides unique insights into gnathostome evolution*", Byrappa Venkatesh et al. Publicado en la revista Nature de enero de 2014.
3. En la entrada "*[Mecánica de fluidos] Flotabilidad*", del blog El Tamiz, Pedro Gómez-Esteban explicó perfectamente la física de su función de flotabilidad.

32. El devónico: los tetrápodos conquistan la tierra

En los dos capítulos anteriores estuvimos desgranando algunos aspectos de lo que ocurrió en el Devónico: su geología y climatología, así como la historia de sus habitantes, hasta ahora las plantas, hongos, artrópodos y peces. Hoy toca completar la saga hablando de cómo algunos de estos últimos desarrollaron las habilidades necesarias como para poder salir a tierra en busca del abundante alimento que allí se encontraba, así como de la protección proporcionada por la ya desarrollada vegetación.

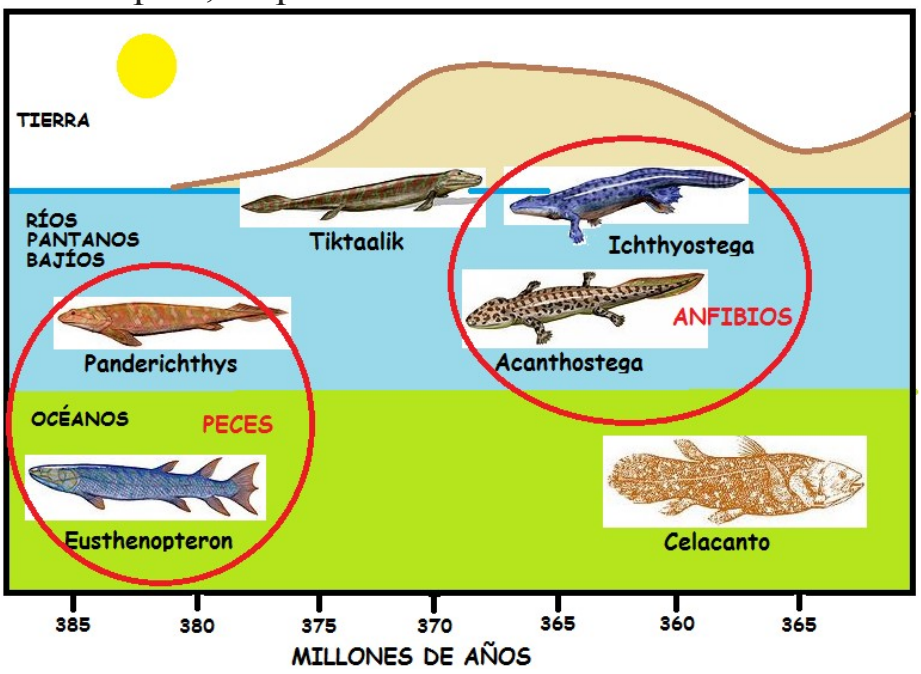
Es en el Devónico más tardío cuando comienza un interesante rosario de diversificación de las especies de vertebrados a partir de los peces de aletas lobuladas pelágicos como el *Eusthenopteron*, que los sacó fuera del agua inaugurando la familia de los primeros anfibios. En este pez ya encontramos en sus aletas una estructura de huesos comparable a la de húmero/cúbito-radio más fémur /tibia-peroné de los futuros tetrápodos.



Esqueleto y aleta pectoral del Eusthenopteron (a partir de wikimedia, dominio público)

La figura siguiente muestra la secuencia de adaptaciones: *Panderichthys*, aún un pez, que coloniza bajíos fangosos. *Tiktaalik*, otro pez pero con muchas características de los tetrápodos. Tenía

aletas semejantes a patas con las que se arrastraba hasta tierra. A partir de él aparecen los primeros tetrápodos en ciénagas con mucha vegetación: *Acanthostega* e *Ichthyostega* con ocho y siete dedos en cada pata, respectivamente.



(A partir de imágenes de wikimedia, GFDL 1.2)

Por su especial importancia como individuo bisagra hablaremos un poco del *Tiktaalik*. Quiere decir "pez de aguas someras" en el idioma de los inuktitut que viven en el Ártico canadiense donde se encontraron sus fósiles. Tengo que recomendar por su amenidad e interés la lectura del libro "*Your inner fish*" escrito por uno de sus descubridores, Neil Shubin, que describe la apasionante aventura que vivió para encontrar por primera vez un fósil de este animal.

El *Tiktaalit* vivió hace aproximadamente 375 millones de años. Del análisis de las rocas donde se han encontrado los fósiles se sabe que habitaba zonas pantanosas en los deltas de los ríos, lugares que se inundaban periódicamente siguiendo los ciclos estacionales, lo que le obligaba a ser un experto en el desplazamiento tanto en agua como en seco. En estas zonas tropicales la vegetación era abundante e intrincada, por lo que no sólo debía dominar la natación, sino también el movimiento por un terreno enmarañado. Su organismo estaba precisamente adaptado a estas necesidades.

Su mezcla de características de pez y tetrápodo condujo a sus descubridores a caracterizar a *Tiktaalik* como un "peztrápodo".

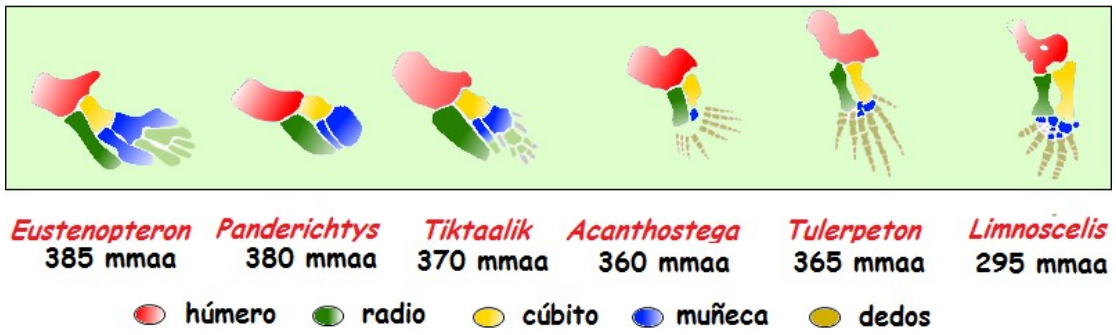


Fósil de Tiktaalit (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Técnicamente es un pez de aletas lobuladas que disponía de una mandíbula primitiva, escamas y una estructura ósea que indica que tenía branquias para respirar. Pero había desarrollado unos cambios morfológicos que lo emparentaban con los posteriores tetrápodos, como así lo demostraba la posición de los ojos en la parte superior de la cabeza que indica que pasaba gran parte de su vida en el fondo del agua mirando desde una posición superior, al igual que lo hace actualmente un cocodrilo. Tenía un cuello móvil en consonancia con lo anterior mientras que la estructura de las costillas se parece a la de los primeros anfibios. Tenía también pulmones para las épocas de sequía, que los llenaba de aire tragándolo por la boca. Además, había desarrollado en su cráneo una incipiente zona auditiva.

Lo que más llama la atención son las aletas, que eran medio de pez, medio extremidad de tetrápodo. Estas aletas tenían un apéndice central compuesto de huesos y músculos suficientemente potente como para poder soportar el peso de su cuerpo contra la fuerza de la gravedad, ya fuera en aguas someras o en tierra. La mayoría de las articulaciones de las aletas eran funcionales, flexionaban. Tenía hombros, codos y hasta unas partes de la muñeca que actuaban de una manera parecida a las de los primeros animales terrestres. Los huesos más distantes de la muñeca parecen ya dedos primitivos, como los que tienen los anfibios.

En la figura siguiente vemos cómo durante la evolución de la estructura de las extremidades hacia las de los tetrápodos van apareciendo tras el húmero un par de huesos con una articulación entre ambos niveles, sobre los que más tarde se organiza mediante una serie de huesecillos una nueva articulación, la muñeca, que permitiría a los dedos una mayor operatividad. El *Acantostega* tenía ocho dedos, resto de una estructura de cuatro dobles encontrada en fósiles anteriores al *Eustenopteron*.

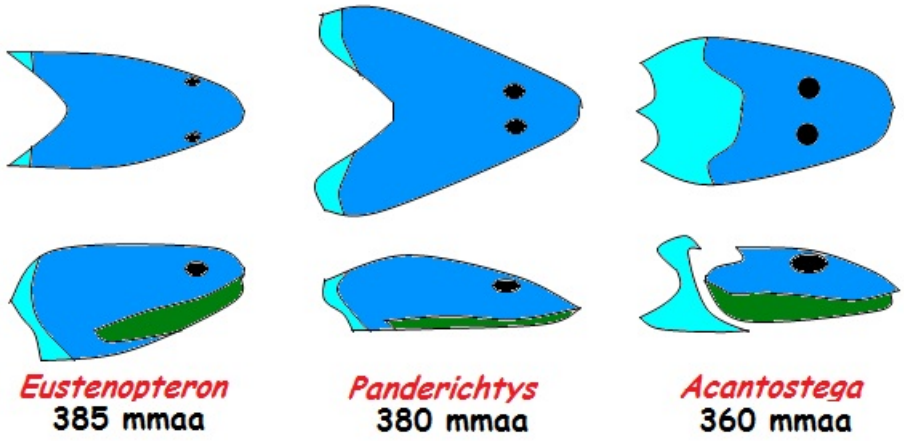


Evolución de aletas de pez a extremidades de tetrápodos

La transición de aletas a patas fue acompañada por un reforzamiento de la estructura de soporte del peso, apareciendo los huesos de los hombros y las caderas, una mayor y más sólida superficie de entronque de los músculos, así como una orientación más lateral de las articulaciones iniciales de cada extremidad en el esquema corporal. Realmente se consiguió una estructura semejante a un puente colgante, la columna vertebral, soportado por cuatro pilares firmemente asentados en un esqueleto modificado, en el que las aletas pectorales pasaron de estar afianzadas en el cráneo a serlo en una caja torácica reforzada, mientras que las aletas pélvicas, independientes en los peces, se sujetaron a una nueva estructura, el conjunto de los nuevos huesos pélvicos.

Estas modificaciones permitieron a los animales que habitaban aguas poco profundas el apoyarse para asomar la cabeza, el protegerse con “costillas” y permitir una mejor expansión de sus incipientes pulmones al ir más erguidos, así como el dominar

nuevas habilidades en la motilidad con unas patas delanteras directoras y unas traseras motoras.



Evolución de la cabeza de los peces durante el proceso de salida del medio acuático

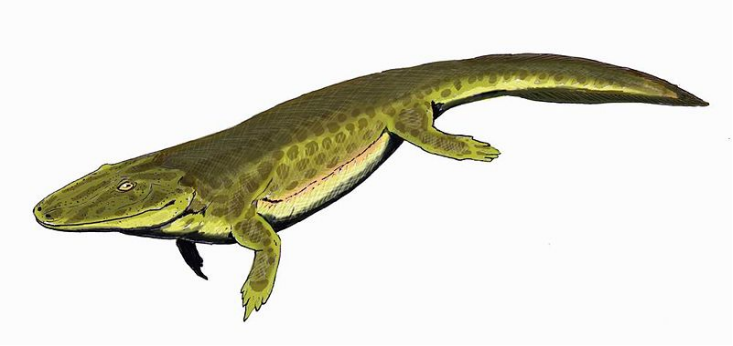
La estructura de la cabeza acompañó a las modificaciones de las extremidades. A medida que se iba evolucionando hacia los tetrápodos, los cráneos se fueron ensanchando y aplanando, pasaron de posición vertical y movimiento derecha-izquierda tipo pez, a horizontal y movimiento arriba-abajo. Los ojos se desplazaron hacia atrás y arriba, lo que dejó un "hocico" más largo que reforzaba la capacidad respiratoria de la boca y permitía ver afuera del agua desde una posición de inmersión. Los huesos del cráneo se fueron soldando, lo que dio mayor rigidez y por tanto la posibilidad de un más fuerte agarre de la palanca mandibular a la hora de morder. Aparece el paladar, lo que como dijimos permitió separar la masticación de la respiración. El último hueso de la cabeza quedó libre al desaparecer el inmediatamente anterior, lo que permitió un "cuello" y una mayor independencia en la movilidad de la cabeza.

Una vez conocido su camino evolutivo, la cuestión es: ¿por qué estos peces sarcopterigios dejaron el medio acuoso?

Hay una teoría muy extendida que intenta explicar que los peces dejaron el agua por necesidades vitales. Se estableció un periodo de sequías que hizo disminuir en gran medida sus hábitats, por lo que

los individuos que mudaron y se adaptaron fueron los que pudieron sobrevivir. Sin embargo esta teoría no está muy bien soportada, pues no hay pruebas de esas sequías en los momentos geológicos en que estos animales abandonaban las aguas, ni se cree que esta causa por sí sola pudiera generar tantos cambios evolutivos. Hoy en día se apuesta más por el estímulo que supondrían las oportunidades que ofrecía la tierra firme.

El ambiente acuático era estresante, estaba superpoblado y presentaba toda clase de peligros, mientras que el terrestre era mucho más seguro, estaba casi despoblado y los recursos eran prácticamente infinitos, dispuestos a ser utilizados por el primero que llegase, sin ninguna competencia. Sabemos que en aquel tiempo había ya muchos invertebrados que se arrastraban por tierra y agua, principalmente en el suelo húmedo, algo más que suficiente para ofrecer a los nuevos colonizadores que lo intentaran oportunidades para alimentarse. Algunos de estos invertebrados eran lo bastante grandes como para alimentarse de tetrápodos pequeños, convirtiéndose en un potencial peligro. Pero a pesar de ello el medio terrestre era un lugar mucho más seguro y ofrecía más que las aguas cenagosas. Las coberturas vegetales y boscosas prestaban ayuda al mimetismo y disimulo. Durante las estaciones secas las transformadas aletas les servirían para desplazarse de charca en charca a medida que se fueran desecando, o incluso en casos extremos podrían reducir su metabolismo y aletargarse enterrados en el barro, como lo hacen sus actuales primos los peces pulmonados de África y Sudamérica.



El tetrápodo devónico Tulerperon en su camino de conquista de tierra firme (Wikimedia, GFDL 1.2)

Una tercera teoría se basa en los siguientes datos: Durante la época anterior a que aparecieran fósiles de transición de peces a tetrápodos se constata una disminución del nivel de O_2 atmosférico, a la par de que se gozaba de un clima templado que favorecía la proliferación de las plantas, las cuales iban creciendo en tamaño. Por otro lado, del estudio de la secuencia de evolución de estos fósiles se observa que los orificios nasales posteriores se van agrandando, así como el hueso hioideo por debajo del cuello, que recordemos provenía del segundo arco branquial. También se observa un sucesivo fortalecimiento del esqueleto del par de patas/aletas anteriores. De esos datos se razona el siguiente escenario:

Los prototetrápodos como el *Tiktaalik* vivían en aguas costeras o estanques cenagosos rodeados de una espléndida vegetación. De esta vegetación caerían troncos y restos que colmatarían estos estanques, llenándolos de nutrientes que empobrecerían de oxígeno a sus aguas. Parece como si la falta de oxígeno en sus branquias les obligara a suplementar sus necesidades de este elemento captándolo directamente con la boca fuera del agua, como lo hacen muchos de los peces actuales. Pero se encontraron con que el nivel atmosférico de este gas no era elevado. Las modificaciones genéticas especializarían a algunos para levantar mejor la cabeza y "respirar" más aire, las fosas olfatorias se fueron deformando, alargándolas hacia atrás hasta que sus aberturas posteriores, que hasta entonces eran externas, conectaron con la faringe, permitiéndoles también tomar aire a través de las fosas olfativas. *Kenichthys* es un espécimen de hace 400 millones de años que tenía ya los dos tipos de orificios. Los que consiguieron extremidades delanteras más fuertes podían mantener más tiempo la cabeza fuera o incluso hacerlo desde aguas ligeramente profundas. A la par se iría desarrollando la bolsa ciega en la base de la faringe que se fue especializando en la absorción de oxígeno, lo que llegaría a convertirla con el tiempo en pulmones. Estas armas les permitieron aprovechar las oportunidades del nuevo

entorno. Éste pudo ser el proceso por el que los vertebrados pasaron del mar a la tierra.

La transición desde el agua al mundo nuevo de la tierra fue casi sin duda un ejemplo de "radiación adaptativa",[1] una rápida apertura de un abanico de nueva vida. Un resquicio por el que se abrió un mundo virgen a los nuevos pioneros, en el que penetraron gracias a sibilinas evoluciones genéticas. No encuentran competencia, y hay alimento y protección de sobras. La reproducción es fácil y la siguiente generación, que ha recibido los nuevos genes de sus padres, es estable y con una mayor capacidad de penetración. Y pasarán de generación en generación afianzándose en poco tiempo los nuevos rasgos en toda la población. Así pudieron surgir nuevas especies con relativa rapidez, así comenzó el éxito de los tetrápodos.

Pero la vida no siempre fue fácil. Al final del Devónico, hace entre 408 y 360 millones de años, se dieron una serie de importantes extinciones de especies a las que se le ha dado el nombre genérico de "extinción masiva del Devónico", la segunda gran extinción del Fanerozoico**.** De hecho, parece tratarse de tres extinciones masivas a lo largo de un periodo de tres millones de años. Los organismos que se vieron más afectados por esta crisis biótica fueron los que habitaban zonas marinas templadas. Por ejemplo, los corales que habían dominado el período vieron mermada su población y hasta el Triásico, 150 millones de años más tarde, no volvieron a tener una presencia importante los arrecifes coralinos. Aproximadamente el 83% de las especies se extinguieron.

Existen también evidencias de una importante era glaciar en Sudamérica, que en aquel momento ocupaba latitudes polares, originada probablemente por la enorme difusión vegetal del Devónico. Las plantas habrían fijado el dióxido de carbono, reduciendo el efecto invernadero que produce este gas contribuyendo así a un enfriamiento global. Aunque se sospecha de esta causa como la principal, no se excluye la influencia de un

impacto extraterrestre, para el que se han propuesto varios posibles lugares de colisión.



Representación ideal de un paisaje devónico (Wikimedia, dominio público)

Nos disponemos a dejar el Devónico con un regusto amargo por este final de extinción. Este periodo rico en anécdotas trascendentales, cuando la tierra fue colonizada no sólo por las plantas, sino también por los insectos, arácnidos y tetrápodos. El periodo en que los peces descubrieron la variedad que en líneas generales no ha cambiado hasta hoy. A partir de entonces el paisaje en tierra ya no fue igual.

La figura anterior no difiere de lo que podemos encontrar en nuestra naturaleza actual. La luz pone calidez a la imagen de este atardecer de lo que sabemos un templado periodo. Los mares crecidos construían largas extensiones de aguas someras, en donde la vida bullía. En el bosque, los licopodios, equisetos y helechos

daban amparo a una fauna de suculentos artrópodos. Las tranquilas aguas parecen esconder, tensas, un primigenio tetrápodo al acecho. Tengo que reconocer que la imagen me sobrecoge el ánimo al pensar que esto pudo ocurrir, tal cual lo veo, hace "tan sólo" unos 400 millones de años, cuando los años duraban la eternidad de cuatrocientos días.

Ahora debemos abandonar aquellos tiempos olvidando el regusto amargo de las extinciones finales, con la sensación relajante que da el contemplar una Tierra ya familiar, consecuencia de tantas migraciones exitosas. Continuemos atentos ante el esplendor que viene: el ciclópeo Carbonífero.

NOTAS DEL CAPÍTULO 32:

1. La **radiación adaptativa** es un proceso que describe la rápida especiación de una o varias especies para llenar muchos nichos ecológicos.