

Cómo la vida se volvió compleja (Parte I): Los dominios de la vida y un poco de su historia evolutiva

Michael F. Dunn

El Dr. Dunn es investigador en el Centro de Ciencias Genómicas de la Universidad Nacional Autónoma de México, en Cuernavaca, Morelos. Estudia la fisiología bacteriana, con un enfoque en la interacción entre bacterias y plantas. Es miembro de la Academia de Ciencias de Morelos.

¿Qué tienen en común una ballena azul, un roble milenario y el hongo más pequeño que se esconde en el suelo del bosque? Todos estos seres están formados por células que empaquetan su ADN dentro de una estructura rodeada por una membrana, llamada núcleo. Este tipo de células se denominan células eucariotas, del griego que significa "núcleo verdadero". Estas formas de vida complejas se clasifican en el dominio Eukarya, cuyos miembros son llamados eucariotes (Figura 1). El dominio Eukarya incluye no sólo a las especies de plantas, animales y hongos que podemos observar fácilmente, sino también a un grupo súper abundante y diverso de microorganismos llamados protistas. Las células eucariotas y los organismos que forman son "la esencia de la vida compleja en la Tierra" [8].

Pero la vida en la Tierra no siempre fue así: comenzó con organismos muy simples [4]. Las primeras células eucariotas surgieron hace unos 2 mil millones de años, y durante los dos mil millones de años anteriores a ese momento el planeta estuvo habitado únicamente por dos clases de organismos microscópicos simples: las bacterias y arqueas, conocidas colectivamente como procariotes (Figura 1). Ambos tipos de organismos carecen de un núcleo.

La evolución de las formas de vida eucarióticas no fue un resultado inevitable de que las células procariotas se volvieran cada vez más complejas con el paso de los eones. De hecho, ocurrió por un evento raro y fortuito [5] en el que una bacteria y una arquea se fusionaron para formar una quimera celular que, con el tiempo, evolucionó hasta convertirse en la célula eucariota. Como resultado de esta unión, los genomas de los eucariotes son un mosaico de genes heredados tanto de bacterias como de arqueas. En general, muchos genes del metabolismo en eucariotes tienen ascendencia bacteriana, mientras que los del procesamiento de la información genética provienen de arqueas. [8,11].

¿Qué más diferencia a los eucariotes de los procariotes? Además del núcleo, las células eucariotas contienen otras estructuras rodeadas por membranas que se denominan colectivamente organelos ("órganos pequeños") (Figura 1). Cada organelo tiene funciones especializadas. Por ejemplo, el sistema de

endomembranas transporta diferentes sustancias dentro de la célula utilizando una red interna de membranas, y las mitocondrias convierten los nutrientes en energía y regulan otras actividades celulares. Todas las células eucariotas contienen mitocondrias, y las plantas verdes y las algas poseen además organelos llamados cloroplastos, que realizan la compleja tarea de convertir la energía luminica en energía química, a través de la fotosíntesis. En términos generales, todos los eucariotes tienen tipos similares de organelos en sus células. [1] (Figura 1).

Entonces, ¿de dónde surgieron los eucariotes y cómo evolucionaron tan rápidamente en términos de tiempo geológico? La respuesta se encuentra unos 2.200 millones de años en el pasado e implica un evento llamado endosimbiosis, que es una forma de cooperación celular que significa "células viviendo dentro de células". Este evento permitió la evolución de la complejidad celular e hizo posibles todas las formas de vida que vemos a diario. En esta primera parte del ensayo veremos el papel de la endosimbiosis en la conformación del árbol de la vida.

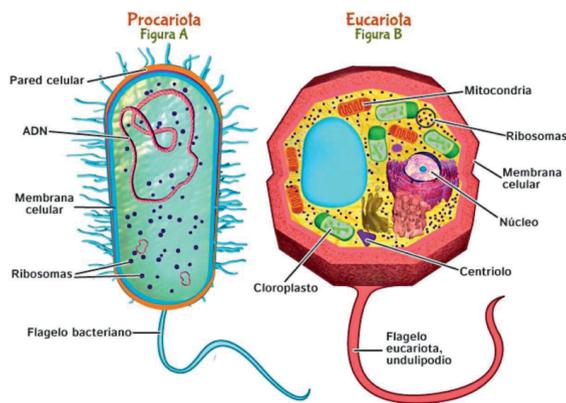


FIGURA 1. ANATOMÍA de las células procariotas y eucariotas. La célula procariota (izquierda) carece de núcleo y de organelos rodeados por membranas. Sus características principales incluyen una membrana celular circundante, ribosomas que producen proteínas y un flagelo que permite la movilidad natoria. La célula eucariota (derecha) posee un núcleo que alberga su ADN junto con otros organelos, como las mitocondrias y los cloroplastos (estos últimos en las células vegetales). El volumen de una célula eucariota típica es entre 10 y 1000 veces mayor que el de una célula procariota. Fuente: <https://e1.portalacademico.cch.unam.mx/alumno/biologia2/endosimbiosis/caracteristicas>. Reproducida de conformidad con el artículo 148 de la Ley Federal del Derecho de Autor.

Los dominios de la vida

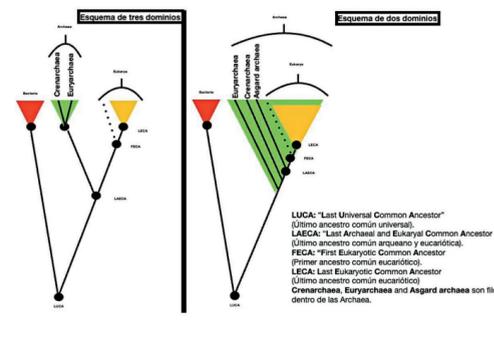
Durante mucho tiempo, los científicos dividieron toda la vida en la Tierra en solo dos grupos: los procariotes y los eucariotes, basándose en la estructura

de sus células. Como se mencionó, los eucariotes incluyen animales, plantas, hongos y protistas. Además de sus organelos, las células eucariotas pueden cambiar de forma y reorganizar su contenido interno usando un andamiaje hecho de diversos filamentos proteicos, conocido como citoesqueleto (Figura 1). Aunque el citoesqueleto no es un organelo (carece de membrana), es un elemento estructural esencial en las células eucariotas [7].

Las células procariotas (bacterias y arqueas) son pequeñas en comparación con los eucariotas y parecen anatómicamente simples (Figura 1). Carecen de núcleo (la palabra procariota significa "antes del núcleo"), mitocondrias, sistema endomembrano y citoesqueleto complejo, que son distintivos de los eucariotes. Aunque bacterias y arqueas pueden parecer similares, tienen metabolismos y formas de decodificar la información genética muy diferentes.

Antes de la década de 1970, se pensaba que todos los procariotes eran bacterias, ya que nadie sabía de la existencia de las arqueas. Fue el microbiólogo Carl Woese, un gigante de la biología

FIGURA 2. ÁRBOLES de la vida que muestran relaciones evolutivas alternativas entre los dominios de la vida. El árbol de tres dominios (izquierda) considera las bacterias, las arqueas y los eucariotes como dominios separados, cada uno con un origen evolutivo distinto. El árbol de dos dominios (derecha) muestra que los eucariotes surgieron dentro del dominio de las arqueas, en lugar de como un linaje separado, y actualmente es el modelo más aceptado. El diagrama se basa en [3].



Más recientemente, se descubrió que un linaje de arqueas llamado Asgard contiene genes que codifican para proteínas que se pensaba que eran exclusivas de los eucariotes. Estas "proteínas de firma eucariota" incluyen a proteínas similares a la actina y tubulina, que forman los citoesqueletos eucariotes, así como proteínas reguladoras similares a las existentes en eucariotes [6]. Muchas similitudes entre los genomas de las arqueas y los eucariotes apuntan a las Asgard como el grupo arqueal más estrechamente relacionado con los eucariotes. Durante mucho tiempo los biólogos se preguntaron sobre la gran brecha de complejidad entre las células procariotas y eucariotas, ya que no había evidencia de un tipo de célula intermedia entre ellas [7]. Esta perspectiva está cambiando con el descubrimiento de las similitudes entre las arqueas Asgard y los eucariotes.

Las fuertes similitudes entre arqueas y eucariotes respaldan la idea de que, en lugar de haber tres dominios de la vida (bacterias, arqueas y eucariotes), como propuso Woese, en realidad solo hay dos: bacterias y arqueas (Figura 2) [3]. Este esquema de dos dominios refleja el origen de los eucariotes dentro de las arqueas en lugar de como un dominio separado que surgió en paralelo a bacterias y arqueas. Como expresó la filósofa de la biología Maureen O'Malley: "...somos un tipo muy extraño de arqueas" [13]. ¿Cómo pudo suceder esto? En realidad, se debe a que los eucariotes somos producto de la cooperación.

Cooperación y competencia en la evolución

La evolución de la vida en la Tierra está impulsada por fuerzas de cooperación y competencia entre los organismos. Dado que la naturaleza se percibe con frecuencia como "roja en diente y garra" (según el poeta Lord Tennyson), podríamos tender a subestimar cómo la cooperación entre organismos ha moldeado el curso de la evolución. Las interacciones cooperativas y duraderas entre diferentes organismos se denominan simbiosis ("vivir juntos") y son omnipresentes en

la naturaleza. El periodista científico Ed Yong tomó prestada la frase "Contengo multitudes" del poeta Walt Whitman (1819-1892) para usarla como título de su excelente libro sobre la composición multiorganismática de prácticamente todos los eucariotes. [14]. El conjunto de microorganismos que habita en y dentro de un organismo se conoce como su microbioma, y está compuesto principalmente por bacterias. Los microbiomas que habitan la superficie y el interior de las plantas y los animales generalmente afectan positivamente su salud y bienestar. Los seres humanos, por ejemplo, albergan miles de especies de bacterias intestinales que ayudan a digerir ciertos alimentos, producen vitaminas esenciales o regulan nuestro sistema inmunológico. Nosotros nos beneficiamos de estos servicios, mientras los miembros del microbioma disfrutan de un entorno estable y rico en nutrientes [14]. Los simpáticos simbiontes de los que hablo aquí se encuentran fuera o en la superficie de nuestras células, no dentro de ellas. Pero también existen simbiontes que pueden invadir y establecerse dentro de las células de un organismo diferente y establecer una endosimbiosis. Una endosimbiosis es una interacción beneficiosa en la que un procariote, llamada endosimbionte, vive dentro de otra célula procariota o eucariota. Esta interacción es estable y cooperativa, y resulta en algún beneficio para el endosimbionte y el hospedador que habita. Por ejemplo, los pulmones parásitos de plantas pueden albergar bacterias *Buchnera aphidicola* como endosimbiontes. Estas bacterias viven dentro de células de pulgón, en estructuras especializadas llamadas bacteriocitos y producen aminoácidos esenciales que el insecto no puede sintetizar por sí solo. Los endosimbiontes de *B. aphidicola* no pueden sobrevivir fuera del in-

secto huésped porque han perdido muchos genes necesarios para la vida independiente. Esta pérdida de genes ocurrió porque el endosimbionte se hereda verticalmente (se transmite de madre a hijo), por lo que *B. aphidicola* no está expuesta a un entorno externo inestable. En cambio, el hospedero proporciona muchos nutrientes y estabilidad ambiental, reduciendo la necesidad de genes necesarios para sobrevivir al estrés y de muchos genes involucrados en rutas metabólicas. Estos factores han llevado al genoma de *B. aphidicola* a convertirse en uno de los más pequeños conocidos en bacterias, con muchos de sus genes enfocados en mantener la simbiosis [14]. Otro ejemplo es la endosimbiosis entre especies de bacterias del suelo llamadas rizobios y plantas leguminosas. Los rizobios infectan las raíces de leguminosas compatibles (por ejemplo, frijoles, cacahuete, trébol) y entran en las células de las raíces. Aquí los rizobios se transforman en una forma dedicada a convertir el nitrógeno atmosférico biológicamente inerte (N₂) en amoníaco (NH₃), una forma de nitrógeno que la planta puede utilizar para su nutrición. Los rizobios a su vez reciben nutrientes que la planta produce por fotosíntesis. A diferencia de *Buchnera*, los rizobios tienen genomas muy grandes. Esto se debe a que la mayoría de las células en cualquier población de rizobios pasan toda su vida en el hábitat cambiante y a menudo hostil del suelo, y requieren muchos genes que les permitan sobrevivir en este entorno desafiante.

El otro lado de la cooperación es la competencia, que ocurre tanto entre individuos de la misma especie como entre especies distintas. Los organismos compiten por los recursos limitados que hay en la naturaleza, y esa lucha es una de las principales fuerzas de la selección natural, que favorece a aquellos individuos cuyas características aumentan sus probabilidades de sobrevivir y reproducirse en un ambiente determinado [2]. Pero la naturaleza también es una red de alianzas cooperativas que influyen igualmente en el éxito evolutivo. Desde los ejemplos de endosimbiosis que mencionamos antes hasta las relaciones mutualistas entre plantas y polinizadores, las interacciones cooperativas pueden mejorar la supervivencia y la reproducción. Así, tanto la competencia como la cooperación son fuerzas en la evolución, y ambas contribuyen a lo que Darwin llamó la "supervivencia del más apto".

De microbios a multicélulas: trazando el árbol genealógico de la

cub.2020.04.048
 9. Marshall M. 2009. Timeline: The evolution of life. New Scientist. 14 July 2009; updated 27 April 2023. <https://www.newscientist.com/article/dn17453-timeline-the-evolution-of-life/>
 10. O'Malley M. 2014. Philosophy of Microbiology. Cambridge University Press. 269p.
 11. Raval, P. K., Zimorski, V., and Martin, W. F. 2004. Endosymbiotic theory. Encyclopedia of Evolutionary Biology Editor(s): Richard M. Kliman, Academic Press, 2016, Pages

vida
 La vida en la Tierra es asombrosamente diversa, abarcando desde simples organismos unicelulares en el suelo hasta complejos animales y plantas en nuestros océanos y bosques. Toda la vida se remonta a una línea ancestral llamada LUCA, de la abreviatura en inglés "Last Universal Common Ancestor" (Último Ancestro Común Universal; Figuras 2 y 3). LUCA surgió en la Tierra hace miles de millones de años (Figura 3). En un ensayo anterior [4], describí la historia de la vida en la Tierra desde su origen abiótico hasta la aparición de LUCA. Aquí, retomaremos el viaje de la evolución de la vida, comenzando con microbios simples y culminando con organismos complejos a lo largo de más de 3 mil millones de años de historia biológica en la Tierra (Figura 3).

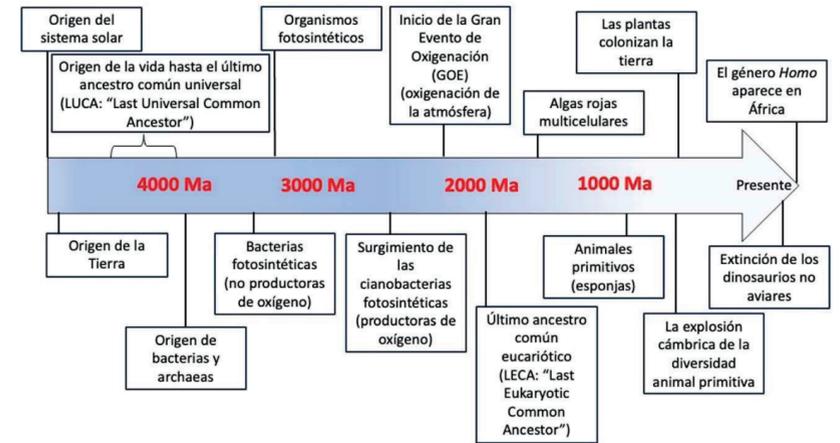


FIGURA 3. ALGUNOS eventos en la historia de la Tierra colocados en una línea del tiempo. El tiempo antes del presente se indica en millones de años (Ma). Hace alrededor de 4 mil millones de años, la vida primitiva había evolucionado y dado origen a LUCA, el Último Ancestro Común Universal, el ancestro compartido de todos los seres vivos. Los procariotas que se asemejan a los linajes modernos de bacterias y arqueas probablemente evolucionaron muy poco tiempo después de LUCA. Hace aproximadamente 2 mil millones de años surgió el ancestro de todos los eucariotas (vivos o extintos), conocido como LECA (Último ancestro común eucariote). A partir de ese punto, se observa el rápido desarrollo de organismos complejos y multicelulares, incluyendo aquellos del género *Homo* (nosotros). Las fechas dadas para estos eventos se basan principalmente en [9].

Un evento que alteró el planeta y que está directamente relacionado con la evolución de la vida compleja fue el Gran Evento de Oxigenación ("Great Oxidation Event", o GOE) (Figura 3). Comenzó el GOE cuando cianobacterias de vida libre, hace aproximadamente 2 400 millones de años, comenzaron a liberar oxígeno a la atmósfera mediante fotosíntesis oxigénica. Los niveles más altos de oxígeno transformaron el paisaje biológico y fue un factor clave en el desarrollo de la vida eucariota, porque el metabolismo aeróbico (que utiliza oxígeno) realizado por las mitocondrias tiene la capacidad de generar la energía necesaria para desarrollar formas

son incapaces de evolucionar hacia una mayor complejidad debido a limitaciones energéticas y genéticas. Incluso la impresionante capacidad de los procariotes para adquirir genes beneficiosos (por mutación o intercambios de genes entre diferentes especies) no es suficiente para superar estas limitaciones [7]. Los procariotes modernos son el resultado de una adaptación continua, cambios genéticos y diversificación en respuesta a ambientes cambiantes, presiones selectivas y nichos ecológicos. Aunque los procariotes modernos comparten algunos rasgos fundamentales con sus antiguos antecesores, los que habitan la Tierra hoy en día han pasado por miles

característica distintiva de las células eucariotas: la mitocondria, como describiremos la próxima semana en la segunda parte de este historia. Nosotros, todas las plantas, otros animales y hongos, somos quimeras; consistimos en células que contienen los remanentes de bacterias que alguna vez fueron de vida libre y que han evolucionado para convertirse en micro-órganos celulares cautivos (organelos) [12].

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org

¿Comentarios y sugerencias? ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

Referencias

1. Cepelwicz J. 2019. Bacterial complexity revises ideas about "Which came first". Quanta Magazine, 12 de julio. <https://www.quantamagazine.org/bacterial-organelles-revises-ideas-about-which-came-first-20190612/>
 2. Darwin C. 1859. On the origin of species: A facsimile of the First Edition. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1964. 513 p.

3. Doolittle WF. 2020. Evolution: Two domains of life or three? Current Biology 30: R177-179. DOI: 10.1016/j.cub.2020.01.010
 4. Dunn, M. F. 2024. Hacia la comprensión del origen de la vida en la Tierra. La Unión de Morelos, Páginas 12-13. 1 abril de 2024 <https://www.launion.com.mx/blogs/ciencia/noticias/247324-hacia-la-comprension-del-origen-de-la-vida-en-la-tierra.html>

5. Gould, S. G. 1989. Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History. W. W. Norton and Co., New York, 347 p.
 6. Heidt A. 2022. The long and winding road to eukaryotic cells. The Scientist. 17 October 2022. <https://www.the-scientist.com/the-long-and-winding-road-to-eukaryotic-cells-70556>
 7. Lane N. 2015. The Vital Question: Energy, Evolution, and the Origins of Complex Life. W. W. Norton & Co., New York. 360 p.
 8. Maderspacher F. 2020. The long dark teatime of the cell. Current Biology 30,R451-R453 DOI: 10.1016/j.

511-517,
 12. Quammen D. 2018. The Tangled Tree. A Radical New History of Life. Simon & Schuster. 480 p.
 13. Wilcox C. 2019. Researchers rethink the ancestry of complex cells. Quanta Magazine April 9, 2019. <https://www.quantamagazine.org/researchers-rethink-the-ancestry-of-complex-cells-20190409/>
 14. Yong E. 2016. I Contain Multitudes: The Microbes Within Us and a Grand View of Life. Ecco, New York, NY, 357 p.

