

Hacia la comprensión del origen de la vida en la Tierra

MICHAEL F. DUNN

El Dr. Michael 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.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

“La vida encuentra un camino”, es la manera en que el Dr. Malcolm, en el libro “Parque Jurásico” de Michael Crichton, describe la asombrosa capacidad de la vida para establecerse y persistir incluso en los lugares más inhóspitos de la Tierra. Mientras presenciamos esto al observar la miríada de seres vivos que colonizan gran parte del planeta, toda vida tuvo que tener un ancestro común que surgió de la no-vida hace mucho tiempo. Nuestra curiosidad es enorme: existen docenas de hipótesis que intentan explicar cómo se originó la vida en la Tierra.

El pensamiento serio sobre cómo se originó la vida en la Tierra tiene sus orígenes en la llamada Revolución Científica en los siglos XVI y XVII. Cambios importantes en el pensamiento y la metodología que allanarían el camino para la investigación sobre el origen de la vida incluyeron la adopción de métodos empíricos de investigación y explicaciones basadas en evidencia, que eventualmente pusieron fin a ideas como la generación espontánea y el vitalismo. La brillante idea de Charles Darwin (1809-1882) sobre la evolución por selección natural nos dio una explicación naturalista para la diversidad de la vida en la Tierra, pero incluso él tenía pistas sobre su origen más allá de reflexionar sobre el comienzo de la vida en “algún pequeño estanque cálido” (2,5). Desde la época de Darwin, la cuestión de los orígenes de la vida ha sido abordada experimental, teórica y filosóficamente por investigadores en la próspera y a menudo controvertida comunidad de investigación del origen de la vida. Todavía hay relativamente poco consenso sobre cómo pudo haberse originado la vida, y existen muchas hipótesis interesantes que buscan explicarlo (1,5,9,10).

Aquí veremos algunas de las formas en que se ha abordado el estudio del origen de la vida y algunas de las ideas propuestas para explicarlo. Comencemos con algunas de las cosas en las que la mayoría de los investigadores del origen de la vida están más o menos de acuerdo.

En lo que coinciden la mayoría de los científicos sobre el origen de la vida

La evidencia de la geología, la paleontología, la biología evolutiva y la química indica que el surgimiento de la vida en la Tierra progresó a través de una serie de pasos que ocurrieron a lo largo de períodos muy largos de tiempo (1,2). La datación radiométrica nos dice que la Tierra se formó hace alrededor de 4.5 mil millones de años (ver Figura 1). Esta técnica determina la edad de las rocas observando cómo se descomponen

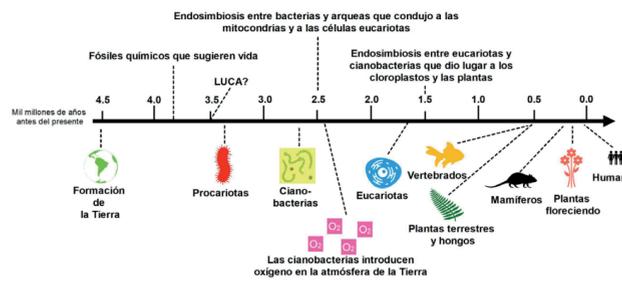


FIGURA 1. UN panorama de eventos importantes en la evolución de la vida en la Tierra. La figura es una modificación de la que aparece en la referencia 8.

los isótopos radiactivos. Por ejemplo, el uranio en las rocas se transforma en plomo a una tasa establecida, conocida como la vida media. Los científicos determinan la edad de una roca observando la proporción de uranio a plomo y calculando cuánto tiempo tomó esa transformación de uranio. Otro tipo de análisis de isótopos nos dice que la vida estuvo presente en la Tierra posterior a los primeros quinientos millones de años de su formación. Esto es sorprendentemente rápido, considerando que la superficie de la Tierra se mantuvo fundida durante gran parte de este tiempo debido al calor generado por la descomposición radiactiva y las colisiones con escombros cósmicos derivados de la formación del sistema solar. Rastros químicos dejados por organismos fotosintéticos existen en rocas de 3.8 a 3.4 mil millones de años de antigüedad (4, 7,12,13) (Figura 1). Estos rastros químicos, o “fósiles químicos”, tienen una proporción distintiva de los isótopos estables del carbono, carbono-12 (C-12) y carbono-13 (C-13). Los organismos fotosintéticos utilizan dióxido de carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis. Los restos de organismos fotosintéticos contienen un poco más de C-12 que C-13 en comparación con el carbono de rocas o de organismos no fotosintéticos. Esto se debe a que la enzima principal para la fotosíntesis (RuBisCo), prefiere usar dióxido de carbono que contiene C-12. Los organismos que realizaban esta fotosíntesis eran bacterias, y realizaban una especie de fotosíntesis “primitiva” que no producía oxígeno. El tipo de fotosíntesis que genera oxígeno evolucionó mucho después en bacterias llamadas cianobacterias (Figura 1) (1,2,12).

Podemos dar una definición provisional de la vida como algo que tiene la capacidad de reproducirse, transmitir rasgos y evolucionar (1,2). Implícita en esta definición está la producción metabólica de energía y biomasa. Otras características que satisfacen nuestra definición operativa y que califican algo como “vivo” incluyen la capacidad de reproducirse y transmitir rasgos a su descendencia. Esto requiere que tengan moléculas portadoras de información (ADN y ARN) que dirigen la producción de proteínas, las cuales realizan y regulan el metabolismo y la reproducción (1,8). “Evolucionar” en nuestra definición se refiere a experimentar la evolución darwiniana, impulsada por cambios genéticos (mutaciones) heredables y selección natural. Las mutaciones son cambios en la secuencia de nu-

cleótidos de un gen, generalmente causados por errores durante el complejo proceso de copia de un gen durante la reproducción. En casos raros, la proteína alterada producida a partir de la forma mutada de un gen funcionará mejor en el organismo que la proteína codificada en la forma original del gen. La selección natural implica que los individuos con rasgos ventajosos conferidos por el gen mutado tendrán más probabilidades de sobrevivir y reproducirse, teniendo así una mejor oportunidad de pasar el gen ventajoso a su descendencia. Con el tiempo, estos mecanismos conducen a la adaptación de las especies a su entorno y a la aparición de nuevas especies. Un último punto de acuerdo entre los científicos es que los seres vivos necesitan una membrana de algún tipo que rodee y delimite cada célula que los compone. La membrana retiene el contenido celular, les permite generar energía química y regula su interacción con el entorno (4).

Formas de estudiar el origen de la vida

Los estudios sobre el origen de la vida combinan tanto las ciencias históricas como las experimentales. Las ciencias históricas (la paleontología y la geología), estudian los restos de eventos pasados e interpretan sus causas y consecuencias. Las ciencias experimentales (física, química y biología), utilizan experimentos controlados para investigar fenómenos naturales.

Si bien los experimentos de laboratorio y las investigaciones históricas pueden sugerir posibilidades sobre cómo se originó la vida, nunca establecerán definitivamente la secuencia de eventos que condujo a la vida, en gran parte porque estos eventos ocurrieron hace tanto tiempo que la mayoría de sus rastros se han borrado con el tiempo. Entonces, ¿cómo han intentado los científicos estudiar el problema?

Una forma de estudiar el origen de la vida es utilizar una estrategia “de abajo hacia arriba” que se centre en el metabolismo. Este enfoque pregunta cómo las moléculas simples presentes en la antigua Tierra podrían reaccionar entre sí para formar sistemas químicos cada vez más complejos, que eventualmente llevaron a una protocélula con algunas de las características de la vida (reproducción, rasgos heredables y la capacidad de evolucionar) (Figura 2). Algunos escenarios de origen de la vida “de abajo hacia arriba” proponen que las protocélulas estaban rodeadas por membranas desde el principio, mientras que otros estipulan

que esto sucedió en una etapa posterior. En cualquier caso, la membrana habría tenido una composición más simple y una función más limitada en comparación con las membranas celulares modernas. Las protocélulas acumularon suficientes modificaciones beneficiosas en su estructura y función para finalmente convertirse en LUCA (de las siglas en inglés para Último Ancestro Común Universal), un microbio completamente vivo (Figuras 1 y 2). LUCA puede no haber sido una sola célula que surgió en un solo lugar, sino que podrían haber sido varios tipos de células que surgieron en diferentes lugares (4).

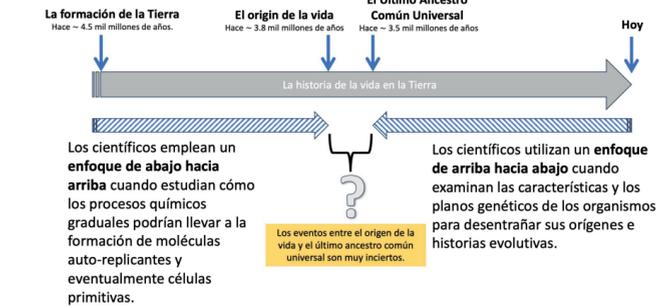


FIGURA 2. DIFERENTES enfoques utilizados para estudiar el origen de la vida y la historia evolutiva.

Ya sea que provenga de uno o varios orígenes, LUCA fue el ancestro de las bacterias y arqueas, dos tipos de microbios que aún prosperan en la Tierra actual. Juntos, estos microbios se conocen como procariotas (Figuras 1 y 2) (3,7). Una segunda forma de examinar el origen de la vida es el enfoque “de arriba hacia abajo”, que analiza la historia genética de los organismos existentes para determinar qué genes estaban presentes en, y por lo tanto fueron heredados de, LUCA (Figura 2). Esta información nos ayuda a definir cómo era LUCA en términos de su metabolismo y otros rasgos, así como los hábitats en la antigua Tierra donde pudo haber vivido.

Dos hipótesis populares sobre el origen de la vida

¿Cómo piensan los científicos que pudo surgir la vida en la Tierra? Una tendencia actual en la investigación del origen de la vida es intentar responder a esta pregunta utilizando enfoques “de abajo hacia arriba” y “de arriba hacia abajo” juntos, en lugar de por separado. Aquí consideraremos dos de las hipótesis “extensas y eclécticas” (10) presentadas para explicar el origen de la vida, ambas apoyadas por estos dos enfoques diferentes (Figura 2). La hipótesis del ARN primero y la hipótesis del metabolismo primero enfatizan la replicación genética y el metabolismo, respectivamente, como los eventos clave tempranos que llevaron a la vida en el planeta (4, 10)

La hipótesis del ARN primero

El modelo del ARN primero (o “mundo del ARN”) propone que el ARN, o una molécula químicamente similar, estuvo presente desde el mismo comienzo del desarrollo de la vida. En este escenario, el ARN funcionaba inicialmente como un genoma que podía autoreplicarse (hacer copias fieles de sí mismo) y transmitir información genética a la descendencia. Este ARN también

podía catalizar algunas reacciones metabólicas. Así, el ARN existió mucho antes de la evolución de ADN y proteínas. A medida que la evolución avanzaba, el almacenamiento de información genética y la mayoría de las funciones catalíticas del ARN fueron asumidos por el ADN y las proteínas, respectivamente. La hipótesis del mundo de ARN en su forma original se remonta a un concepto propuesto en 1962 por el biólogo y físico Alexander Rich. Ha dado lugar a muchas teorías relacionadas que mantienen un papel central para el ARN, pero difieren en los tipos específicos de nucleótidos, moléculas auxiliares y reacciones químicas que participaron. Es atractiva porque

palabras, ¿cómo podría surgir un sistema para transmitir información genética sin metabolismo, y viceversa? La respuesta probablemente sea que el metabolismo y el procesamiento de la información genética evolucionaron conjuntamente desde las primeras etapas de la vida (Figura 3), por lo que el debate entre el ARN primero y el metabolismo primero ofrece en realidad una dicotomía falsa, debido a que pudieron haber evolucionado simultáneamente (4,5,10).

Mundos basados en el metabolismo primero

La función clave que ocurrió muy temprano en el origen de la vida en el mundo basado en el metabolismo primero es, por supuesto, el metabolismo. Hay muchas variaciones de la hipótesis del metabolismo primero, pero la mayoría concuerda en que el desarrollo temprano de la vida dependía de reacciones químicas autostenibles que podrían ocurrir ya sea espontáneamente o con la ayuda de energía obtenida del entorno sin necesidad de catalizadores (7). Posteriormente, reacciones más complejas requirieron el uso de minerales como catalizadores, lo que permitió el surgimiento de vías metabólicas que eventualmente dieron lugar a proteínas y moléculas informativas (ARN y ADN) (4,5,10). Una hipótesis del metabolismo primero bien documentada propone que la vida se originó en las fuentes hidrotermales alcalinas oceánicas. Esta hipótesis surgió de ideas propuestas de manera independiente por el químico Günter Wächtershäuser y el geoquímico Michael Russell, desarrolladas con más detalle con contribuciones del microbiólogo William Martin (5). Las fuentes hidrotermales alcalinas se encuentran en las profundidades de los océanos y constan de formaciones parecidas a torres de roca porosa. Estas fuentes existen en diversas ubicaciones hoy en día, como la formación de fuentes hidrotermales Lost City ubicada cerca de cordillera submarina conocida como la Dorsal Atlántica. Entonces, al igual que ahora, la formación de fuentes hidrotermales reaccionarían naturalmente en la Tierra primitiva. Algunos de estos compuestos podrían haber llegado a meteoritos, los cuales colisionaban con la Tierra con frecuencia en el joven sistema solar (2,4,11).

Algunas de las dificultades con la hipótesis incluyen la capacidad muy limitada del ARN para autoreplicarse en ausencia de catalizadores de proteínas. Si bien el ARN en los organismos modernos participa en muchas reacciones químicas, su versatilidad catalítica es limitada en comparación con las proteínas. Además, las moléculas de ARN también son bastante inestables y propensas a la degradación, lo que complica aún más su papel como entidades autoreplicantes (3). Se ha logrado algún progreso en este sentido, con muchos laboratorios que han creado bloques de construcción de ARN en condiciones similares a las que se cree que existieron en la antigua Tierra, e incluso logrando unirlos en cadenas de ARN relativamente cortas (3,4).

¿Cómo podría funcionar el ARN en ausencia de proteínas? En la bioquímica moderna, el ARN requiere proteínas para transmitir información genética, sin embargo, las proteínas mismas se producen según las instrucciones en el ADN a través de un intermediario de ARN. En otras

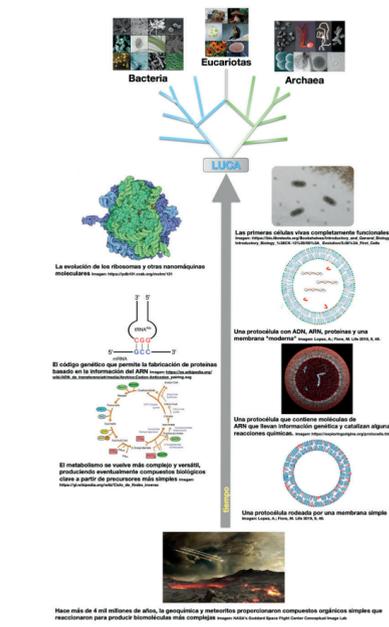


FIGURA 3. UN resumen de los eventos probables que abarcan desde reacciones químicas abióticas tempranas hasta el surgimiento de LUCA. La figura se basa en una que aparece en (3).

proporcionada por desequilibrios de carga llamados gradientes electroquímicos. Las soluciones ácidas son ricas en protones (iones de hidrógeno con carga positiva). En la antigua Tierra, el agua de mar era más ácida de lo que es hoy. El agua de mar ácida que rodeaba los poros en la fuente establecida en protones. En contraste, el fluido alcalino dentro de los poros contenía pocos protones. Esta desigualdad en las concentraciones de protones estableció un gradiente electroquímico entre el agua de mar y el interior de los poros, los cuales estaban separados por las delgadas paredes de roca que los rodeaban. Este gradiente electroquímico proporcionó energía para la producción de varios compuestos esenciales para la vida, incluido el acetilfosfato, una forma primitiva de la molécula portadora de energía llamada ATP, un ‘combustible’ importante en las células modernas. Reacciones adicionales catalizadas con la ayuda de los minerales en los poros de la fuente habrían llevado a la producción de aminoácidos (los bloques de construcción de proteínas), nucleótidos (los bloques del ADN y ARN), lípidos (grasas y aceites) y membranas. La evidencia experimental muestra que estas biomoléculas se habrían concentrado por la acción de corrientes térmicas dentro de los poros (3-5), lo que les permite hacer contacto con más frecuencia y, por lo tanto, reaccionar o unirse más fácilmente. Como se mencionó anteriormente, la formación de membranas probablemente fue un paso vital temprano en la evolución de protocélulas. Además de confinar el contenido de la célula y así mantener las moléculas concentradas, las membranas también permiten generar energía mediante gradientes electroquímicos al asumir la función de las particiones rocosas entre los poros en las fuentes. Esto permitiría que las protocélulas formadas en las fuentes hidrotermales abandonen estos ambientes, colonizen otros nichos y evolucionen más (3-6). Los resultados obtenidos utilizando un enfoque de arriba hacia abajo para predecir el metabolismo en LUCA brindan

apoyo a la hipótesis de las fuentes hidrotermales alcalinas. Hoy en día, los procariontes llamados metanógenos y acetógenos viven en las fuentes al consumir dióxido de carbono y gas de hidrógeno, lo cual recuerda al tipo de metabolismo que se propone que evolucionó en estas fuentes hace unos 4 mil millones de años (6). La hipótesis de las fuentes hidrotermales alcalinas es atractiva porque establece paralelos entre el entorno químico y físico de las fuentes y la bioquímica que realmente tiene lugar en organismos modernos primitivos (4,6).

Investigaciones futuras sobre el origen de la vida

Muchas preguntas permanecen sin respuesta en nuestra búsqueda por entender el origen de la vida. Por ejemplo, ¿la vida en la Tierra surgió solo una vez o en múltiples ocasiones en diferentes lugares? En la actualidad, existe apoyo para ambas alternativas (3,4,7). ¿Cómo se desarrolló la complejidad celular, es decir, cómo se organizaron las moléculas, a lo largo de extensos períodos de tiempo, para formar células primitivas? Hasta ahora, las hipótesis del mundo del ARN y las fuentes hidrotermales han proporcionado algunas respuestas plausibles, pero aún deben llenarse muchos vacíos.

Para guiar la investigación futura, deberíamos asumir que la vida podría haber evolucionado más de una vez, quizás en entornos diferentes. Los organismos tempranos que surgieron en un lugar podrían haber tenido que moverse, por ejemplo, al ser transportados por el viento o las corrientes oceánicas, a un entorno diferente adecuado para que completen su progresión hacia LUCA y más allá (4,12). Hacer un progreso real en los estudios del origen de la vida probablemente requerirá un presupuesto y una infraestructura de “ciencia grande”, del tipo necesario para experimentos en física de partículas, por ejemplo. Los experimentos deben diseñarse para dar resultados en un tiempo razonable (años, tal vez décadas) en lugar de múltiples vidas humanas o

milenios. Aunque mucho más difícil de concebir, financiar y llevar a cabo que experimentos más modestos que examinan piezas más pequeñas del rompecabezas del origen de la vida, los experimentos exhaustivos a gran escala pueden ser la única manera de acelerar el ritmo de la investigación y obtener una comprensión integral de esta pregunta fundamental (3).

Referencias

- Bartlett S, Wong ML. 2020. Defining life in the universe: From three privileged functions to four pillars. *Life* 10,42. Doi:10.3390/life10040042.
- deGrasse Tyson N, Goldsmith D. 2004. *Origins: Fourteen Billion Years of Cosmic Evolution*. W. W. Norton and Co., New York, 345 p.
- Harrison SA, Ramm H, Liu F, Halpern A, Palmeira RN, Lane N. 2023. Life as a guide to its own origins. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 54:327-350.
- Jowett, P, Rayne, R., Tomas S. 2017. Myth and fact in the origins of cellular life on earth. *Bioscience Horizons* 10.1093/biohorizons/hzx017.
- Lane N. 2015. The Vital Question: Energy, Evolution, and the Origins of Complex Life. W. W. Norton and Co., New York, 360 p.
- Lane N. 2017. Proton gradients at the origin of life. *Bioessays* 39:1600217.
- Martin WF, Weiss MC, Neukirchen S, Nelson-Sathi S, Sousa FL. 2016. Physiology, phylogeny, and LUCA. *Microbial Cell* 3: 582–587. doi:10.15698/mic2016.12.545
- O'Malley MA. 2014. *Philosophy of Microbiology*. Cambridge University Press, United Kingdom, 269 p.
- Omran A, Pasek M. 2020. A constructive way to think about different hydrothermal environments for the origins of life. *Life* 10,36; doi:10.3390/life10040036.
- Preiner M, Asche S, Becker S, Betts HC, Boniface A et al. 2020. The future of origin of life research: Bridging decades-old divisions. *Life* 10,20; doi:10.3390/life10030020
- Trefil, J., and Morowitz Smith, H. J. 2009. The origin of life. *American Scientist* 97:206-213. https://www.americanscientist.org/article/the-origin-of-life
- Weiss, M. C., Preiner, M., Xavier, J. C., Zimorski, V., and Martin, W. F. 2018. The last universal common ancestor between ancient Earth chemistry and the onset of genetics. *PLOS Genetics* 14(8): e1007518. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007518.
- Wimmer J, Martin W. 2022. Likely energy source behind first life on Earth found “hiding in plain sight”. *Frontiers Science News*, https://blog.frontiersin.org/2022/01/19/frontiers-microbiology-origin-of-life-energy-hydrothermal-vents/

Esta columna se prepara y edita semanalmente con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

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: <https://acmor.org/>
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

