

Biomorfos: mecanismo integrador del origen de la vida

Biomorphs: integrating mechanism of the origin of life

Marcelino Antonio Zúñiga-Estrada ^{a,b}, Erick Alfredo Zúñiga-Estrada ^{a,b}, Abel Moreno ^c, Mayra Cuéllar-Cruz ^{b*}

Abstract:

Life is the result of a complex network of chemical reactions and molecular interactions that arose on Earth once primitive minerals were able to self-assemble in a way that allowed them to self-reproduce and evolve. However, exactly how, where and when life first appeared on our planet is still unknown. In this article, we review various theories of geochemical evidence associated with the origin of life, which provide a fundamental, although often rudimentary, view of the emergence of early life on planet Earth.

Keywords:

Origin of life, minerals, geochemistry, chemical reactions

Resumen:

La vida es el resultado de una compleja red de reacciones químicas e interacciones moleculares que surgieron en la Tierra una vez que los minerales primitivos pudieron autoensamblarse de tal manera que les permitió autorreproducirse y evolucionar. Sin embargo, aún se desconoce exactamente cómo, dónde y cuándo apareció la vida por primera vez en nuestro planeta. En este artículo, revisamos diversas teorías de evidencia geoquímica asociada al origen de la vida, que proporcionan una visión fundamental, aunque a menudo rudimentaria, de la aparición de vida temprana en el planeta tierra.

Palabras Clave:

Origen de la vida, minerales, geoquímica, reacciones químicas

Introducción

¿Cómo y dónde se originó la vida en la Tierra? Hasta la fecha, se han propuesto varios entornos como lugares plausibles para el origen de la vida. Sin embargo, las discusiones se han centrado en una etapa limitada de la evolución química o en la aparición de una función química específica de los sistemas protobiológicos. Aún no está claro qué situaciones geoquímicas podrían impulsar todas las etapas de la evolución química, desde

la condensación de compuestos inorgánicos simples hasta el surgimiento de sistemas autosostenibles que pudieran evolucionar hacia sistemas biológicos modernos. En este artículo, resumimos los hallazgos experimentales y teóricos informados sobre la química prebiótica relevante para este tema. Las reacciones puramente inorgánicas de sílice, carbonatos e hidróxidos metálicos pueden producir estructuras complejas autoorganizadas que imitan la textura de los biominerales, la morfología de los organismos primitivos y que catalizan

^{a,b} Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0000-0003-1040-9670>, Email: marcelino_zuniga@uaeh.edu.mx

^{a,b} Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | Mineral de la Reforma, Hgo. | México, <https://orcid.org/0009-0001-7174-0255>, Email: erick_zuniga@uaeh.edu.mx

^c Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Química | Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, CDMX | México, <https://orcid.org/0000-0002-5810-078X>, Email: carcamo@unam.mx

^b Autor de Correspondencia | Universidad de Guanajuato | Departamento de Biología | Col. Noria, Guanajuato, Gto. | México, <https://orcid.org/0000-0002-6616-7917>, Email: mcuellar@ugto.mx

reacciones prebióticas. Los organismos vivos y sus productos bioquímicos afectan la cristalización de minerales, como el carbonato de calcio y el fosfato de calcio, formando materiales compuestos híbridos (orgánicos-inorgánicos), llamados biominerales, con formas y texturas significativamente diferentes de sus contrapartes puramente inorgánicas.^{1,2} Se pensaba que estas propiedades tenían su origen únicamente en la vida y son la razón fundamental detrás del uso de la morfología para la detección de los restos de vida más antiguos en este planeta.^{3,4} Esta visión fue cuestionada por el descubrimiento de que la sílice afecta gravemente la cristalización de algunos carbonatos, lo que induce materiales compuestos inorgánicos-inorgánicos autoensamblados llamados "biomorfos"⁵ que imitan la morfología y la forma química de los supuestos microfósiles encontrados en pedernales arcaicos^{6,7} y las texturas de algunos biominerales calcíticos.⁸ Este fenómeno de autoensamblaje ocurre cuando los minerales de carbonato precipitan en soluciones ricas en sílice en condiciones alcalinas, es decir, en un pH que oscila entre 9.5 y 12.5 con una fuente de carbonato, como el CO₂ atmosférico, en un intervalo de temperatura de 4° a 100°C. En este sentido existen algunas teorías que sugieren que estos componentes se sintetizaron abióticamente, se acumularon en algún lugar, se condensaron en polímeros, interactuaron entre sí y, finalmente, evolucionaron hasta convertirse en un sistema autosostenible a través de fenómenos naturales en la Tierra primitiva. Se ha realizado un número considerable de simulaciones de laboratorio para explorar las condiciones más plausibles para estos procesos, especialmente para las etapas de síntesis. Para cubrir este tema tan relevante, primero resumiremos los hallazgos teóricos del origen de la vida para posteriormente concluir con los experimentos reportados para la química prebiótica asociada a la formación de biomorfos.

Hipótesis del origen de la vida

Teoría de la sopa prebiótica

Con el tiempo, los filósofos y científicos han propuesto muchas teorías diferentes sobre el origen de la vida. La teoría más conocida es la teoría de la "sopa prebiótica" planteada por Oparin en 1924.⁹ En esta teoría, los compuestos orgánicos se creaban en una atmósfera reductora a partir de la acción de la luz solar y los rayos. Luego, los compuestos se disolvieron en el océano primitivo, se concentraron y se polimerizaron hasta formar gotas (Figura 1) "coacervadas". Las gotitas crecieron por fusión con otras gotitas, se dividieron en gotitas hijas por la acción de maremotos y desarrollaron la capacidad de catalizar su propia replicación a través de la selección natural, lo que eventualmente condujo al surgimiento de la

vida. Posteriormente, se cuestionó la relevancia de los coacervados para el origen de la vida porque los coacervados no tienen barrera de permeabilidad, por lo que carecen de la capacidad de absorción de nutrientes y liberación de desechos que son funciones esenciales para el metabolismo encapsulado.¹⁰ Sin embargo, los méritos científicos de la propuesta de Oparin no están en sus detalles, sino en la posibilidad de probar su plausibilidad con una investigación científica rigurosa.¹¹ Al cambiar sus detalles con el perfeccionamiento del conocimiento científico, el escenario se ha convertido en un punto de partida de muchas teorías modernas sobre el origen de la vida. Se ha argumentado, por ejemplo, que el proceso de concentración de moléculas orgánicas podría haber ocurrido de manera más efectiva en charcos de marea, ambientes helados y/o en superficies minerales que en agua oceánica en masa.¹² Las piscinas de marea permitirían el procesamiento y la concentración de una gran variedad de reactivos transportados por los ríos, el océano y la atmósfera. Las piscinas de marea tienen al menos cuatro características ventajosas para la síntesis orgánica prebiótica: acumulación de minerales detríticos pesados, ciclos de evaporación-concentración, un gradiente en la actividad del agua y alta porosidad.¹³ Las superficies minerales podrían haber jugado un papel importante en la polimerización de monómeros orgánicos. Se ha estimado que en la Tierra había hasta 1.000 especies minerales en el momento del origen de la vida, hace entre 4.500 y 4.000 millones de años.¹⁴

Origen hidrotermal de la vida

El descubrimiento de organismos termófilos en asociación con sistemas hidrotermales de aguas profundas a finales de la década de 1970 llevó a una nueva idea de que la vida podría haberse originado en sistemas hidrotermales en la Tierra primitiva.¹⁵ Los beneficios percibidos que se ofrecen a la vida temprana en este entorno incluyen protección contra intensos bombardeos de asteroides y radiación ultravioleta, y una fuente de energía térmica y química, junto con minerales potencialmente catalíticos.¹⁶ Diversos campos de investigación han proporcionado evidencia que respalda este escenario. Por ejemplo, los geólogos han detectado evidencia de metanogénesis microbiana a partir de inclusiones fluidas en precipitados hidrotermales de 3,5 Gyr de antigüedad.¹⁷ Utilizando enfoques de biología molecular, los biólogos han demostrado que los habitantes microbianos termófilos del fondo marino activo pueblan las ramas más profundas del árbol filogenético universal.¹⁸ Los químicos han afirmado que, tanto sobre bases teóricas como experimentales, las condiciones físicas y químicas que son características de los sistemas hidrotermales de aguas profundas son favorables para la síntesis abiótica de moléculas orgánicas bioquímicamente significativas.¹⁹

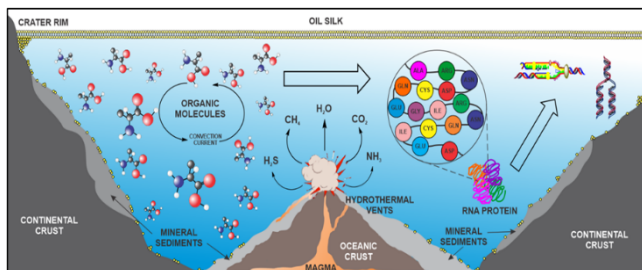


Figura 1. Sopa prebiótica.

Origen extraterrestre de la vida

Otra fuente importante de compuestos orgánicos en la Tierra primitiva es la llegada de objetos extraterrestres (meteoritos, cometas y partículas de polvo interplanetario).²⁰ Esta teoría sostiene que la vida se originó en otras partes del universo donde las condiciones eran favorables y se transfiriera a la Tierra después de que las condiciones de la superficie se calmaran.²¹ El aparentemente corto lapso de tiempo entre el enfriamiento de la Tierra y la aparición de microbios de apariencia moderna (hace 4,2–3,8 Gyr) se ha tomado como evidencia que respalda esta idea.²² Kirschvink ha propuesto un origen marciano para la vida terrestre.²³ Los argumentos que respaldan esta idea incluyen que a concentraciones más altas de nutrientes como el boro²⁴ y el fósforo²⁵ tenían más probabilidades de existir en el Marte primitivo que en la Tierra con formas químicamente disponibles, las condiciones fisicoquímicas (contenido de agua, estado redox, temperatura, etc.) en el Marte primitivo podrían haber sido mejores para la evolución de los sistemas bioquímicos primitivos que las de los inicios de la Tierra,²⁶ y considerando que los meteoritos son capaces de transferir vida desde la superficie de Marte a la superficie de la Tierra sin someterla a temperaturas esterilizantes y rayos UV solares.²⁷ Estas ideas plantean la posibilidad de que la vida no necesariamente evolucionó en cada planeta en el que ocurre, sino más bien en un solo lugar, y luego se extendió por la galaxia a otros sistemas estelares a través del impacto de cometas y/o meteoritos.

Biomorfos de silico-carbonatos

Los biomorfos de silico-carbonatos de metales alcalinotérreos presentan otro sistema modelo interesante para el surgimiento de microestructuras complejas a partir de reacciones de precipitación simples.²⁸ En el ejemplo más común, los biomorfos se forman mediante la coprecipitación de carbonatos de metales alcalinotérreos y sílice amorfa en un medio altamente alcalino (Figura 2). Estas reacciones puramente inorgánicas autoorganizan estructuras con formas realistas, como hojas cardioides, filamentos helicoidales, cortinas onduladas y embudos cónicos.²⁹ El sello distintivo de los biomorfos de silico-

carbonatos de metales alcalinotérreos son sus formas no diédricas, suavemente curvadas, que no se limitan a las simetrías cristalográficas típicas. A nanoescala, estas estructuras organizan miles de nanobarras cristalinas en conjuntos altamente ordenados que se asemejan a biominerales naturales. Sin embargo, mientras que la biomineralización se basa en decenas de proteínas para controlar el tamaño, el hábito y la selección de polimorfos de los cristales,³⁰ los biomorfos se ensamblan espontáneamente y sin la ayuda de ningún aditivo orgánico.

A pesar de su complejidad estructural, los biomorfos se sintetizan mediante procedimientos experimentales simples³¹ específicamente por difusión-reacción en geles de sílice, difusión de gas o métodos monofásicos en solución. Aunque la mayoría de los estudios se han centrado en la dinámica de mesoescala del crecimiento de los biomorfos, se han hecho algunos intentos de delinear el mecanismo químico subyacente. Una hipótesis sugiere la aparición de oscilaciones locales de pH que impulsan la coprecipitación del ion carbonato y la sílice amorfa.³² En este escenario, la cristalización de nanobarras de carbonato de bario induce una disminución del pH en las proximidades de los cristales en crecimiento. Este cambio local en el entorno químico promueve la precipitación de sílice amorfa, que, a su vez, aumenta nuevamente el pH y da como resultado una mayor formación de nanocristales de carbonato de bario. En consecuencia, el crecimiento biomorfo sólo es posible dentro de un rango estrecho de condiciones iniciales que explotan esta retroalimentación autocatalítica para impulsar la coprecipitación.

Otro aspecto interesante de los biomorfos de los silico-carbonatos de metales alcalinotérreos es su similitud morfológica con los restos fosilizados de formas de vida primitivas. Los ejemplos más interesantes son los supuestos fósiles arcaicos más antiguos conocidos encontrados en Australia (denominados cherts en su grafía inglesa). Estas microestructuras habían sido descritas como cianobacterias filamentosas que datan de hace 3.500 millones de años.³³

Sin embargo, estas estructuras con formas biológicas son totalmente inorgánicas y representan aún un enigma para explicar por qué esas formas son tan características. Son tan reproducibles, que cada vez que uno repite el experimento de síntesis, se reproducen las formas y si se mueven algunos parámetros de pH o tipo de metal alcalinotérreo aparecen nuevas formas muy características. Los tamaños de los biomorfos dependen del tipo de síntesis: se obtienen en la escala de micrómetros si se sintetizan en solución y si se sintetizan en geles el tamaño es en la escala de los milímetros. Estos biomorfos suelen caracterizarse a través de técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) si están en la

escala de los micrómetros o por microscopia óptica cuando están en la escala de los milímetros. Estos son estructuras autoorganizadas de cristales de carbonatos de metal alcalinotérreo que se use (Ca, Ba o Sr) y estos cristales se depositan en las membranas de silicio perfectamente ordenados y en direcciones específicas. Siguen en ocasiones distribuciones que pueden explicarse por modelos matemáticos muy complejos.

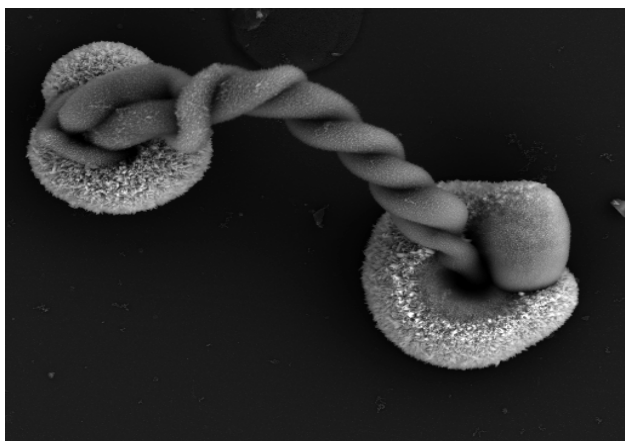


Figura 2. Biomorfo de silico-carbonato de bario.

Conclusiones

El conocimiento actual sobre las teorías sobre síntesis de materiales avanzados e inteligentes ha avanzado de tal manera que se podrían proponer mecanismos plausibles para la formación de estos materiales inorgánicos complejos. Hallazgos recientes sugieren que las reacciones químicas acopladas entre minerales con tendencias opuestas de solubilidad dependientes del pH pueden permitir la autoorganización de los nanocristales en estructuras de orden superior con múltiples niveles jerárquicos. Existen claras analogías entre estos materiales puramente inorgánicos y las estructuras cristalinas producidas naturalmente con respecto a la jerarquía, la composición o morfología. Por lo tanto, el conocimiento adquirido sobre las vías morfogenéticas de estos procesos podría ser valioso para una comprensión más profunda de los procesos de biomineralización.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por las facilidades otorgadas a Marcelino Antonio Zúñiga Estrada (CVU: 784081) y Erick Alfredo Zúñiga Estrada (CVU: 350391) en el desarrollo de los proyectos de Estancia Posdoctoral Inicial de Ciencia de Frontera con No. 2365907 y 2891301 respectivamente.

Referencias

- [1] H. A. Lowenstam, S. Weiner, On Biomineralization (Oxford Univ. Press, 1989).
- [2] P. Behrens, E. Bauerlein, Handbook of Biomineralization: Biomimetic and Bioinspired Chemistry (Wiley, 2009).
- [3] R. Buick. (1990). Microfossil recognition in Archean rocks: An appraisal of spheroids and filaments from a 3500 m.y. old chert-barite unit at North Pole, Western Australia. *Palaios*, 5, 441–459.
- [4] M. D. Brasier, O. R. Green, A. P. Jephcoat, A. K. Kleppe, M. J. Van Kranendonk, J. F. Lindsay, A. Steele, N. V. Grassineau. (2002). Questioning the evidence for Earth's oldest fossils. *Nature* 416, 76–81.
- [5] M. Kellermeier, H. Cölfen, J. M. García-Ruiz. (2012). Silica biomorphs: Complex biomimetic hybrid materials from "Sand and Chalk". *Eur. J. Inorg. Chem.* 2012, 5123–5144.
- [6] J. M. García-Ruiz, A. Carnerup, A. G. Christy, N. J. Welham, S. T. Hyde. (2002). Morphology: An ambiguous indicator of biogenicity. *Astrobiology* 2, 353–369.
- [7] J. M. García-Ruiz. (1998). Carbonate precipitation into alkaline silica-rich environments. *Geology* 26, 843–846.
- [8] J. M. García-Ruiz, Geochemical scenario for the precipitation of biomimetic inorganic carbonates, in Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World, J. P. Grotzinger, N. P. James, Eds. (SEPM Special Publication, ed. 67, 2000), pp. 75–89.
- [9] A.I. Oparin. (1957). The Origin of Life on the Earth Oliver & Boyd, Edinburgh.
- [10] J.A. Thomas, F.R. Rana. (2007). The influence of environmental conditions, lipid composition, and phase behavior on the origin of cell membranes. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 37 pp. 267–285.
- [11] J. Pereto. (2005). Controversies on the origin of life. *International Microbiology*, 8, pp. 23–3.
- [12] J.L. Bada, A. Lazcano. (2002). Some like it hot, but not the first biomolecules. *Science*, 296, pp. 1982–1983.
- [13] E.E. Stueken, R.E. Anderson, J.S. Bowman, W.J. Brazelton, J. Colangelo-Lillis, A.D. Goldman, S.M. Som, J.A. Baross. (2013). Did life originate from a global chemical reactor? *Geobiology*, 11, pp. 101–126.
- [14] H.J. Cleaves, A.M. Scott, F.C. Hill, J. Leszczynski, N. Sahai, R. Hazen. (2012). Mineral–organic interfacial processes: potential roles in the origins of life *Chemical Society Reviews*. 41, pp. 5502–5525.
- [15] F.L. Sousa, T. Thiergart, G. Landan, S. Nelson-Sathi, I.A.C. Pereira, J.F. Allen, N. Lane, W.F. Martin. (2013). Early bioenergetics evolution *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 368.
- [16] N.G. Holm. (1992). Why are hydrothermal systems proposed as plausible environments for the origin of life? *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 22, pp. 5–14.
- [17] Y. Ueno, K. Yamada, N. Yoshida, S. Maruyama, Y. Isozaki. (2006). Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archean era. *Nature*, 440, pp. 516–519.

- [18] A.L. Reysenbach, E. Shock. (2002). Merging genomes with geochemistry in hydrothermal ecosystems. *Science*, 296, pp. 1077-1082.
- [19] E.L. Shock, M.D. Schulte. (1998). Organic synthesis during fluid mixing in hydrothermal systems. *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 28513-28527.
- [20] C.F. Chyba, P.J. Thomas, L. Brookshaw, C. Sagan. (1990). Cometary delivery of organic molecules to the early Earth. *Science*, 249, pp. 366-373.
- [21] P.B. Price. (2010). Microbial life in martian ice: a biotic origin of methane on Mars? *Planetary and Space Science*, 58, pp. 1199-1206.
- [22] W.L. Nicholson. (2009). Ancient micronauts: interplanetary transport of microbes by cosmic impacts. *Trends in Microbiology*, 17, pp. 243-250.
- [23] J.L. Kirschvink, B.P. Weiss, N.J. Beukes. (2006). Boron, ribose, and a martian origin for terrestrial life. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, p. A320.
- [24] J.D. Stephenson, L.J. Hallis, K. Nagashima, S.J. Freeland. (2013). Boron enrichment in Martian clay. *PLoS One*, 8, p. e64624.
- [25] C.T. Adcock, E.M. Hausrath, P.M. Forster. (2013). Readily available phosphate from minerals in early aqueous environments on Mars. *Nature Geoscience*, 6, pp. 824-827.
- [26] L. Kirschvink, B.P. Weiss. (2003). Mars, panspermia, and origin of life: where did it all begin? *Journal of Geography*, 112, pp. 187-196.
- [27] B.P. Weiss, J.L. Kirschvink, F.J. Baudenbacher, H. Vali, N.T. Peters, F.A. Macdonald, J.P. Wikswo. (2000). A low temperature transfer of ALH84001 from Mars to Earth. *Science*, 290, pp. 791-795.
- [28] M. Kellermeier, H. Cölfen, J. M. García-Ruiz. (2012) Silica biomorphs: Complex biomimetic hybrid materials from "sand and chalk." *Eur. J. Inorg. Chem.*, 5123–5144.
- [29] S. T. Hyde, A. M. Carnerup, A.-K. Larsson, A. G. Christy, J. M. García-Ruiz. (2004) Self-assembly of carbonate-silica colloids: Between living and non-living form. *Physica A* 339, 24–33.
- [30] S. Mann, *Bioinorganic Chemistry: Principles and Concepts in Bioinorganic Materials Chemistry* (Oxford Univ. Press, Oxford, 2001).
- [31] E. Nakouzi, P. Knoll, O. Steinbock. (2016). Biomorph growth in single-phase systems: Expanding the structure spectrum and pH range. *Chem. Commun.* 52, 2107–2110.
- [32] M. Wilson. (2009). Oscillating chemistry explains complex, self-assembled crystal aggregates. *Phys. Today* 62, 17–18.
- [33] J. W. Schopf. (1993). Microfossils of the Early Archean Apex chert: New evidence of the antiquity of life. *Science* 260, 640–646.