

RECURSO DIDÁCTICO SOBRE QUÍMICA PREBIÓTICA: HERRAMIENTAS PRÁCTICAS PARA COMPRENDER EL ORIGEN DE LA VIDA

Ana Elisa Valderrama-Méndez¹, Luan Xanath Castillo-Alcalá¹ y Saúl Alberto Villafañe-Barajas²

¹ Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, Investigación Científica S/N, C. U., Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México, México.

² Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior S/N, C. U., Coyoacán, Apartado Postal 70-543, C.P. 04510, Ciudad de México, México

*saul.villafane@correo.nucleares.unam.mx

RESUMEN

El origen de la vida sigue siendo un enigma a pesar de los grandes avances científicos en las últimas décadas en las áreas de investigación de química prebiótica, astrobiología, geología espacial, biología molecular, entre muchas otras. En este trabajo, se explora cómo la química prebiótica, a través del estudio de la interacción entre minerales y moléculas orgánicas, ofrece pistas sobre los procesos que podrían haber conducido al surgimiento de la vida. Se propone un recurso didáctico que aborda los pasos interconectados que precedieron al surgimiento de las primeras formas de vida, desde la síntesis hasta la adquisición de propiedades emergentes en polímeros orgánicos. Este material educativo busca facilitar la comprensión del origen de la vida a través de una presentación accesible y clara de conceptos complejos, fomentando el aprendizaje activo y la reflexión sobre los procesos fundamentales involucrados.

Palabras clave: Origen de la vida, química prebiótica, minerales, propuesta didáctica.

ABSTRACT

The origin of life remains a puzzle despite the great scientific advances of the last decades in the areas of prebiotic chemistry, astrobiology, space geology, molecular biology, among many others. This paper explores how prebiotic chemistry, through the study of interaction between minerals and organic molecules, offers clues about the processes that could have led to the emergence of life. A didactic resource is proposed that addresses the interconnected steps that preceded the appearance of the first life forms, from synthesis to the acquisition of emergent properties in organic polymers. This didactic material aims to facilitate the understanding of the origin of life through an accessible and clear presentation of complex concepts, encouraging active learning and reflection on the fundamental processes involved.

Keywords: Origin of life, prebiotic chemistry, minerals, teaching proposal.

INTRODUCCIÓN

A pesar de los continuos descubrimientos sobre los sistemas planetarios extrasolares, la increíble adaptación de organismos a diversos ambientes, o la gran versatilidad de funciones de los polímeros de ácidos nucleicos, hasta el día de hoy no sabemos cómo se originó la vida. A pesar de que innumerables formas de vida han evolucionado a lo largo de miles de millones de años en el planeta Tierra, todavía hay grandes huecos sobre cómo y en qué momento se formaron y desarrollaron las primeras entidades vivas. Sin embargo, actualmente existe una línea de evidencias experimentales que sugiere que la complejidad química, que precede al origen de la vida y que fue producto de la interacción continua entre minerales y moléculas orgánicas, conllevó una serie de pasos interconectados. En este trabajo se desarrolló una propuesta de recurso didáctico para público de nivel medio superior con el objetivo de explicar los procesos que pudieron estar involucrados en la formación de estructuras químicas complejas y el origen de la vida.

¿Cómo se estudia el origen de la vida?

El origen de la vida es un área de investigación multidisciplinaria enfocada en estudiar y entender los procesos y condiciones que pudieron llevar al origen y desarrollo de la complejidad molecular (macromoléculas con estructura y funciones específicas) y posteriormente a las primeras formas de vida. Actualmente, hay dos enfoques a partir de los cuales se puede estudiar este tema: “de arriba abajo” (*top-down*) o analítico, y “de abajo arriba” (*bottom-up*) o sintético (Preiner *et al.*, 2020). El enfoque analítico se basa en un análisis comparativo de las moléculas que almacenan y transmiten información (p. ej., ácidos nucleicos) presentes en los organismos actuales y estudia sus posibles características genotípicas (conjunto de genes) y fenotípicas (conjunto de características observables) y sus caminos evolutivos (Preiner *et al.*, 2020). Por otro lado, el enfoque sintético simula experimental y teóricamente las interacciones entre moléculas orgánicas bajo diversas condiciones ambientales que pudieron estar presentes en la Tierra primitiva (Krishnamurthy, 2018). De manera general, este último enfoque utiliza las herramientas y conocimientos de diversas ciencias para englobarlas en un campo de estudio llamado «química prebiótica».

Química prebiótica

La química prebiótica surgió en los años 50 cuando Stanley L. Miller, inspirado por las ideas de Harold Urey, diseñó un experimento utilizando tres elementos básicos: una fuente de energía (p. ej., descargas eléctricas), un medio de reacción (p. ej., agua), y precursores de moléculas orgánicas (p. ej., CH_4 , NH_3 , y H_2). Con este experimento, S. Miller buscaba simular las interacciones océano-atmósfera en la Tierra primitiva y comprobar si era posible sintetizar moléculas más complejas (Miller, 1953; Fry, 2006). Este experimento demostró que era relativamente sencillo sintetizar algunas moléculas orgánicas complejas (p. ej., aminoácidos, ácidos carboxílicos) que están presentes en los seres vivos y sentó las bases experimentales para desarrollar modelos de posibles ambientes primitivos. Hoy en día, la química prebiótica está muy lejos de sintetizar “vida” en el laboratorio, y más bien se enfoca en estudiar la síntesis, estabilidad, reactividad y polimerización de diversas moléculas, así como el desarrollo de la complejidad química en condiciones que pudieron haber existido en la Tierra primitiva o en otros cuerpos celestes (Bruylants et al., 2011; Cleaves, 2012).

Minerales: una pieza fundamental

Dentro de los experimentos de química prebiótica, los minerales son un componente que se utiliza frecuentemente por varias razones. Por un lado, es ampliamente aceptado que había una gran cantidad de depósitos minerales en diversos ambientes primitivos (p. ej., silicatos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas) (Hazen et al., 2008). Por otro lado, múltiples experimentos han evidenciado la versatilidad de los minerales respecto a su capacidad para interactuar con moléculas orgánicas: por ejemplo, brindan un medio protector y facilitan el anclaje y concentración de moléculas orgánicas, orientan las reacciones químicas hacia mecanismos de descomposición preferente, pueden interactuar selectivamente con biomoléculas con una estructura química específica, y desempeñar un papel catalítico en reacciones químicas y optimizarlas (Baú et al., 2020; Colín-García et al., 2018; Hazen y Sverjensky, 2010; Lambert, 2008; Negron y Ramos, 2004; Zaia, 2012).

Actualmente existe una línea de evidencias experimentales que sugiere que la complejidad química que precedió al origen de la vida siguió una serie de pasos interconectados y fue producto de la interacción continua entre minerales y moléculas orgánicas. A continuación se presenta el material educativo diseñado para explorar y explicar el concepto de química prebiótica y su relevancia en el estudio del origen de la vida. Este recurso busca proporcionar herramientas accesibles y claras para ayudar a comprender cómo las interacciones entre minerales y moléculas orgánicas bajo condiciones prebióticas pudieron haber contribuido al surgimiento de las primeras formas de vida en la Tierra (Figuras 1 a la 5). Con este material se pretende facilitar la comprensión de un tema complejo a través del aprendizaje activo y la reflexión sobre los procesos fundamentales que dieron origen a la vida en nuestro planeta.

PROPUESTA DE RECURSO DIDÁCTICO

La serie de pasos interconectados que precedió al surgimiento de las primeras formas de vida se puede explicar de la siguiente manera:

Síntesis. Los bloques de construcción de las células son las moléculas orgánicas (p. ej., aminoácidos, lípidos, bases nitrogenadas, ácidos carboxílicos). Por lo tanto, tuvieron que sintetizarse continuamente y en diversos ambientes para dar paso a otras moléculas más grandes y con mayor complejidad química. Las condiciones de síntesis son muy variables y pueden depender de diversos parámetros fisicoquímicos, como la acidez del medio, la temperatura, las fuentes de energía, el estado redox, la presión y la presencia de minerales. Cabe mencionar que la síntesis de moléculas generalmente no es espontánea y que muchas de ellas son inestables en entornos acuosos y tienden a romperse. En consecuencia, se están desarrollando continuamente nuevos experimentos para establecer rutas de reacción más consistentes con las condiciones primitivas, analizar el papel de otros precursores químicos y mejorar los rendimientos de la síntesis y la selectividad de los productos.

Propuesta didáctica. Las moléculas orgánicas se ejemplifican con tres figuras geométricas comunes de colores primarios, representado a los bloques de construcción de moléculas complejas. El garrafón de plástico simula el medio en el cual los componentes interactúan (p. ej. océano primitivo). La fuente de energía se puede mostrar usando un foco (Figura 1).

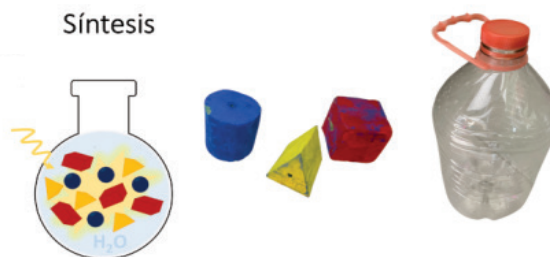


Figura 1. Síntesis: Las moléculas orgánicas se ejemplifican con 3 figuras geométricas comunes de colores primarios, representando a los bloques de construcción de moléculas complejas. El garrafón de plástico simula el medio en el cual los componentes interactúan (p. ej. océano primitivo).

Concentración. Gracias a diversas herramientas geoquímicas y geológicas, se ha propuesto que durante los primeros años de la formación del planeta Tierra existía una enorme variedad de minerales (p. ej., silicatos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, arcillas). La gran versatilidad de estructuras minerales y sus propiedades fisicoquímicas pudieron promover diversas interacciones con las moléculas disponibles en el ambiente. A este proceso se le conoce como *sorción*, y aunque depende de numerosas variables, tuvo que ser un fenómeno positivo y persistente que favoreció la formación de moléculas más complejas al reducir las energías de activación de enlaces, produciendo mayor concentración y estabilidad.

Propuesta didáctica. Los minerales se pueden fabricar usando esponjas de forma rectangular. En cada una de ellas, hay que hacer agujeros con la forma que corresponda a las figuras geométricas elaboradas en el primer paso. Esto ejemplificará que cada mineral tiene una estructura particular y la capacidad de sorber diferentes moléculas orgánicas. Por lo tanto, esta interacción puede favorecer el aumento de concentración de moléculas en la superficie mineral (Figura 2).

Concentración

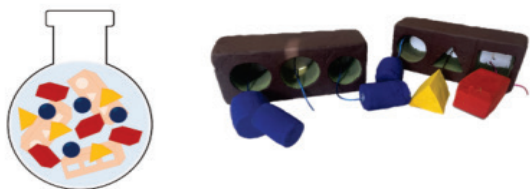


Figura 2. Concentración: Los minerales se pueden fabricar usando esponjas en forma rectangular. En cada una de ellas, es necesario diseñar agujeros con la forma que corresponda a las figuras geométricas elaboradas en el primer paso. Esto ejemplificará que cada mineral tiene una estructura particular y la capacidad de sorber diferentes moléculas orgánicas.

Selección. La selectividad mineral es la forma en que algunos minerales tienden a priorizar la sorción de moléculas específicas sobre otras. Diversos experimentos sugieren que la interacción entre superficies minerales y moléculas orgánicas pudo ser selectiva debido a ciertos factores como la afinidad química entre el mineral y la molécula orgánica, la concentración, los grupos funcionales de la molécula, la estructura mineral y la estabilidad de los enlaces.

Propuesta didáctica. El proceso de sorción selectivo se evidencia con el hecho de que una figura geométrica (molécula orgánica) encaja con el agujero que tiene su forma equivalente en la esponja (mineral). De esta manera se explica cómo algunos minerales tienen una configuración que favorece el anclaje de una molécula orgánica con una estructura específica (Figura 3).

Selección



Figura 3. Selección: El proceso de sorción selectivo se evidencia con el hecho de que una figura geométrica (molécula orgánica) encaja con el agujero que tiene su forma equivalente en la esponja (mineral). De esta manera, se explica cómo algunos minerales tienen una configuración que favorece el anclaje de una molécula orgánica con una estructura específica.

Polimerización. Concentrar y seleccionar los minerales fue crucial para definir el siguiente paso en el desarrollo de la complejidad molecular: la polimerización, que es la formación de extensas cadenas de moléculas orgánicas por medio del continuo ensamblaje de sus estructuras básicas (p. ej., protoácidos nucleicos, protoproteínas). Este fenómeno pudo haber sido favorecido en las estructuras laminares de los minerales arcillosos (p. ej., esmectitas). Por otro lado, tales polímeros difícilmente fueron homogéneos y más bien estaban formados por moléculas con grupos funcionales similares que, dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas, se unían de manera preferencial.

Propuesta didáctica. La interacción entre moléculas orgánicas similares se puede demostrar construyendo cadenas y usando como eslabones las figuras geométricas. Cabe resaltar que las cadenas resultantes pueden tener un arreglo homogéneo y mixto, mostrando así la versatilidad de polímeros que se pudieron formar en condiciones primitivas (Figura 4).

Polimerización



Figura 4. Polimerización: La interacción entre moléculas orgánicas similares se puede demostrar construyendo cadenas y usando como eslabones las figuras geométricas. Cabe resaltar que las cadenas resultantes pueden tener un arreglo homogéneo y mixto, mostrándose así la versatilidad de polímeros que se pudieron formar en condiciones primitivas.

Plegamiento y propiedades emergentes. Los polímeros, que adquirirían tamaños y estructuras cada vez más complejos, pudieron tomar una configuración tridimensional debido al plegamiento (p. ej., proto-RNA-proteínas). Tal disposición pudo favorecer el desarrollo de diversas propiedades emergentes como la interacción específica con otras moléculas, la optimización de reacciones químicas, la formación o rompimiento de enlaces, etc. Tales propiedades emergentes se fueron seleccionando y optimizando hasta prevalecer en el medio y enriquecerlo con estructuras y moléculas específicas, siendo la antesala de configuraciones altamente complejas, como los ribosomas.

Propuesta didáctica. Elaborar una cadena con un considerable número de eslabones para poder evidenciar su plegamiento y la formación de una estructura en 3D. Esta figura realizará un plegamiento específico. El objetivo es mostrar que la estructura tridimensional puede interactuar (p. ej., sorción, formación o rompimiento de enlaces específicos) con moléculas más complejas. Es necesario diseñar una nueva figura con una estructura más elaborada, un corazón, por ejemplo (Figura 5).

Plegamiento y propiedades emergentes



Figura 5. Plegamiento y propiedades emergentes: Elaborar una cadena con un considerable número de eslabones para poder evidenciar su plegamiento y la formación de una estructura en 3D. El objetivo es mostrar que la estructura tridimensional puede interactuar (p. ej., sorción, formación o rompimiento de enlaces específicos) con moléculas más complejas. Es necesario, diseñar una nueva figura con una estructura más elaborada, por ejemplo, un corazón.

CONCLUSIONES

El estudio del origen de la vida puede ser malinterpretado o sobrestimado por los términos que emplea. Por lo tanto, resulta importante transmitir los conceptos y objetivos de esta área de estudio de forma precisa. El desarrollo y la implementación de este recurso didáctico sobre química prebiótica es un esfuerzo para favorecer la comprensión del origen de la vida. Al proponer elementos y herramientas accesibles al público es posible abordar conceptos complejos. Esta propuesta promueve la explicación práctica de temas de ciencia básica, como la evolución de complejidad molecular, a través de un enfoque didáctico. Esto no sólo facilita la comprensión de conceptos difíciles, sino que también fomenta la participación y el aprendizaje significativo.

Para una mejor ilustración de cómo este material se presentaría en clase, por favor, vea el siguiente video: (https://drive.google.com/file/d/1b9B08pm1fHSr3Gh3cgwY9l8P3XF7mKD/view?usp=drive_link).

AGRADECIMIENTOS

Las y los autores agradecen enormemente las aportaciones, trabajo e ideas de nuestro compañero y colega Juan Nicolás Balderas-Pérez, quién ayudó a desarrollar la propuesta de trabajo y la presentación del material didáctico.

Agradecemos a la ENES Unidad Juriquilla UNAM habernos permitido presentar el material didáctico propuesto en este artículo y ponerlo a prueba durante la tercera edición del Simposio de la Tierra, llevado a cabo del 15 al 17 de abril, frente a un público de nivel medio-superior y superior.

REFERENCIAS

- Baú, J. P. T., Villafañe-Barajas, S. A., da Costa, A. C. S., Negrón-Mendoza, A., Colín-García, M. y Zaia, D. A. (2020). Adenine adsorbed onto montmorillonite exposed to ionizing radiation: Essays on prebiotic chemistry. *Astrobiology*, 20(1), 26-38.
- Bruylants, G., Bartik, K. y Reisse, J. (2011). Prebiotic chemistry: a fuzzy field. *Comptes Rendus Chimie*, 14(4), 388-391.
- Cleaves, H. J. (2012). Prebiotic chemistry: what we know, what we don't. *Evolution: Education and Outreach*, 5(3), 342.
- Colín-García, M., Villafañe-Barajas, S., Camprubí, A., Ortega-Gutiérrez, F., Colás, V. y Negrón-Mendoza, A. (2018). Prebiotic chemistry in hydrothermal vent systems. *Handbook of Astrobiology*, 297-329.
- Fry, I. (2006). The origins of research into the origins of life. *Endeavour*, 30(1), 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2005.12.002>
- Hazen, R. M. y Sverjensky, D. A. (2010). Mineral surfaces, geochemical complexities, and the origins of life. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a002162-a002162. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a002162>
- Hazen, R. M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, R. T., Ferry, J. M., McCoy, T. J., Sverjensky, D. A. y Yang, H. (2008). Mineral evolution. *American Mineralogist*, 93(11-12), 1693-1720.
- Krishnamurthy, R. (2018). Life's biological chemistry: a destiny or destination starting from prebiotic chemistry? *Chemistry—A European Journal*, 24(63), 16708-16715.
- Lambert, J.-F. (2008). Adsorption and polymerization of amino acids on mineral surfaces: a review. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 38(3), 211-242. <https://doi.org/10.1007/s11084-008-9128-3>
- Miller, S. L. (1953). A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 117(3046), 528-529. <https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528>
- Negrón-Mendoza, A. y Ramos-Bernal, S. (2004). The role of clays in the origin of life. En *Origins: genesis, evolution and diversity of life* (pp. 181-194). Springer.
- Preiner, M., Asche, S., Becker, S., Betts, H. C., Boniface, A., Camprubi, E., Chandru, K., Erastova, V., Garg, S. G. y Khawaja, N. (2020). The future of origin of life research: bridging decades-old divisions. *Life*, 10(3), 20.
- Zaia, D. A. M. (2012). Adsorption of amino acids and nucleic acid bases onto minerals: a few suggestions for prebiotic chemistry experiments. *International Journal of Astrobiology*, 11(4), 229-234. <https://doi.org/10.1017/S1473550412000195>

Manuscrito recibido: 1 de abril de 2024
 Manuscrito corregido recibido: 16 de mayo de 2024
 Manuscrito aceptado: 30 de mayo de 2024