

El papel de los silico-carbonatos desde la era precámbrica hasta nuestros días

Melissa García-Fernández, Isis Daniela Romo Franco, Mayra Cuéllar-Cruz*
Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N, Col. Noria Alta, C.P. 36050, Guanajuato, Guanajuato, México. *Email: mcuellar@ugto.mx

Resumen

La era precámbrica está asociada al origen de la vida, ya que en esa época es en donde se obtuvieron las primeras biomoléculas, las cuales en conjunto dieron lugar a la primera célula. De esta manera, al paso de los años y el cambio de los factores ambientales, las primeras células evolucionaron para dar lugar a organismos superiores multicelulares como son las plantas y animales. Interesantemente, se ha documentado que existen organismos que se han conservado desde la era precámbrica hasta nuestra época, estos son los radiolarios y diatomeas. No obstante, aun cuando se tienen estos organismos, no es suficiente para poder explicar el origen de la vida. Para lograr comprender el origen de la vida, se deben elucidar las interacciones de los compuestos inorgánicos que existían en la era precámbrica. En este sentido, se han descrito compuestos silico-carbonatos de bario o estroncio denominados biomorfos que emulan morfologías de organismos como son de flores, hojas, tallos, hélices, gusanos, radiolarios, diatomeas, entre otros. Se ha propuesto que los biomorfos pueden estar implicados en el origen de la vida. El objetivo del presente trabajo fue revisar la posible implicación de los silico-carbonatos desde la era precámbrica hasta nuestros días.

Palabras clave: Silico-carbonatos; Biomorfos; Era precámbrica; Cherts.

Introducción

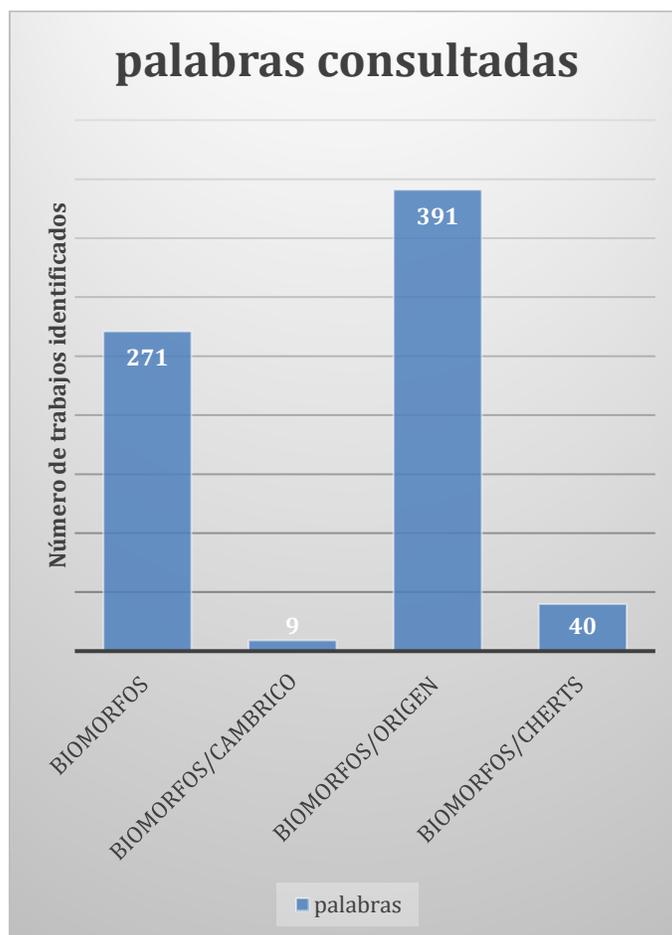
Diversos trabajos han mostrado que el origen de la vida está asociado con la era Precámbrica, por lo que las condiciones y presencia de elementos químicos básicos presentes en esa época para la vida se encuentran en ese entorno. Durante la era precámbrica en la Tierra sucedieron eventos extremos de frío, humedad, calor, aridez, ciclos glaciares, aunado a condiciones reductoras. No obstante, aun cuando se ha reportado que en esa época no se contaba con las condiciones adecuadas para dar origen al primer organismo, la vida apareció como consecuencia de las altas presiones y gases atmosféricos, como metano, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.¹⁻²

Los restos fósiles más antiguos que se conocen se denominan cherts por su nombre en inglés, desde el punto de vista geológico datan del precámbrico y presentan morfologías características que se cree son la reminiscencia del origen de la vida en la Tierra. A principios del siglo veinte Lillie, Mary y Herrera descubrieron que ciertos precipitados inorgánicos tenían una morfología peculiar, los cuales se obtenían lejos de las condiciones del equilibrio termodinámico y ocurrían en reacciones de presión osmótica como las que ocurren a nivel celular. Estos precipitados fueron denominados como biomorfos por primera vez por García Ruiz y Amorós en 1981 en honor al trabajo de Richard Dawkins, debido a su morfología real. Dawkins usó el término en su libro *The Blind Watchmaker* para describir estructuras realistas desarrolladas por su software de computadora (Dawkins, 1988). Estos silico-carbonatos son nanocristales autoensamblados que se forman en ambientes ricos en sílice. Sus morfologías recuerdan mucho las formas de la vida primitiva, pero los precipitados son inorgánicos y se forman sin la intervención de ningún material orgánico. Se considera que estos organismos representan el pasado y el presente de nuestro planeta, característica que los hace un buen modelo de estudio para analizar la relación entre estos silico-carbonatos con los primeros organismos formados en la era precámbrica.³ Es tal el parecido con los microfósiles del precámbrico, que una investigación detallada, mediante comparaciones estrictas de estos biomorfos con los microfósiles arcaicos, podría indicarnos que la vida no se generó en ese periodo geológico, sino que es más reciente. Tal que lo que se ha datado en realidad son biomorfos de sílice que se formaron de acuerdo a las condiciones químicas y físicas que prevalecían en esa era geológica y que la inclusión en rocas sedimentarias no es otra cosa, más que un simple proceso de biomineralización común. Aun cuando se tiene una hipótesis que durante la era precámbrica se originó el primer organismo, es importante analizar si los biomorfos son la

reminiscencia de los cherts del precámbrico. El objetivo del presente trabajo fue revisar si existe una posible correlación entre los biomorfos con los cherts generados durante el precámbrico y con otras etapas posteriores a esta era.

Metodología

La base de datos consultada fue Google scholar, las palabras clave utilizadas fueron: biomorfos, biomorfos-cambriico, biomorfos-origen y biomorfos-cherts. El resultado de la búsqueda de información se presenta en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Clasificación de los resultados obtenidos en las diferentes bases de datos.

Resultados

Factores abióticos presentes en la era precámbrica que han sido evaluados en la formación de biomorfos

La era Precámbrica se considera la primera y más larga era geológica en la historia de la Tierra. Esta etapa es crítica en la génesis de la historia geológica y natural de la Tierra porque la vida y las rocas se originaron en este período. Las características más importantes de este período son una atmósfera reductora, altas temperaturas y constantes tormentas con mucha electricidad, revelando que desde su formación, la Tierra se encuentra en constante intercambio eléctrico.³ La electricidad atmosférica es el resultado de la ionización de la atmósfera por la radiación solar y del movimiento de las nubes de iones.³ De esta forma, la Tierra se carga eléctricamente y actúa como un enorme condensador esférico.³ Estos hechos indican que debido a que la corriente eléctrica existe desde la era Precámbrica, la carga eléctrica es parte de los principales componentes de las reacciones químicas en el origen de la vida. Este hecho fue considerado por Miller (1953), quien en su experimento sintetizó aminoácidos emulando las condiciones de la era Precámbrica, también incluyó una corriente eléctrica generada por electrodos. Esto es relevante porque aparentemente la vida está asociada a fuerzas eléctricas que dirigen todos los procesos dentro de la célula. En este sentido, se ha evaluado la síntesis de biomorfos obtenidos bajo corriente eléctrica positiva y negativa. En este trabajo bajo corriente eléctrica positiva se obtuvieron BaCO₃ (I) tipo aragonito y BaCO₃ (II) tipo calcita, mientras que bajo corriente negativa, se obtuvieron grafito de carbono y BaCO₃ tipo aragonito(I) (Figs. 1, 2).³

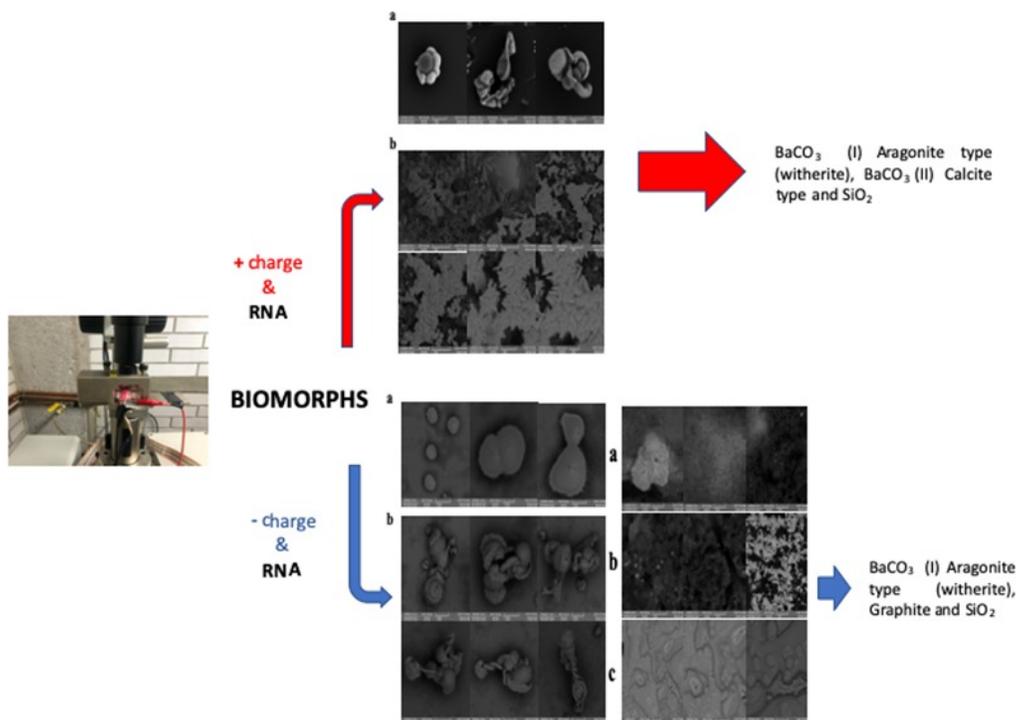


Figura 1. Biomorfos obtenidos bajo corriente positiva y negativa. Tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M. y Moreno, A. (2020). Synthesis of crystalline Silica-Carbonate biomorphs of Ba (II) under the presence of RNA and positively and negatively charged ITO electrodes: obtainment of graphite via bioreduction of CO₂ and its implications to the chemical origin of life on Primitive Earth. *ACS omega*, 5(10), 5460-5469.

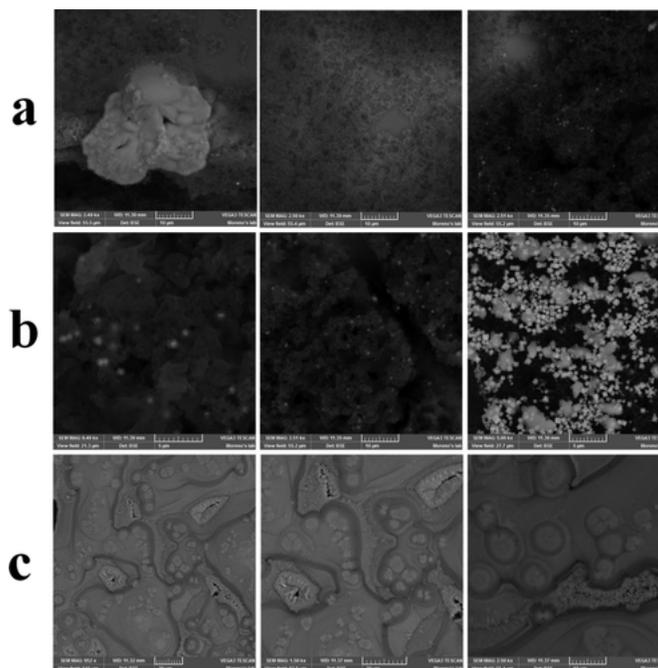


Figura 2. Micrografías por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) de biomorfos obtenidos bajo corriente eléctrica negativa con ARN con diferentes morfologías (a - c). Tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M. y Moreno, A. (2020). Synthesis of crystalline Silica-Carbonate biomorphs of Ba (II) under the presence of RNA and positively and negatively charged ITO electrodes: obtention of graphite via bioreduction of CO₂ and its implications to the chemical origin of life on Primitive Earth. *ACS omega*, 5(10), 5460-5469.

Estos datos pueden ser considerados como la primera evidencia que muestra que la presencia de ARN y electricidad es fundamental en el reordenamiento de los átomos, lo que sugiere que los compuestos orgánicos (formados por carbono) e inorgánicos coexistieron en la era Precámbrica y podrían tener algunas implicaciones en el origen químico de la vida en la Tierra.³

Otro factor prevalente en la era precámbrica, fue la luz ultravioleta (UV), la cual, se encontraba directamente en el medio ambiente porque la capa de ozono aún no se había formado; este último coincidió con la falta de oxígeno en ese tiempo.⁴ Las estimaciones del clima temprano variaban de bajo 0 °C a más de 70 °C, y las estimaciones del pH del océano iban desde fuertemente ácido a alcalino.⁵

Se ha reportado que los primeros elementos químicos que existieron en la tierra, fueron los generados durante el Bing Bang que dio origen al universo, donde se ha propuesto la generación de hidrógeno y helio en forma de isótopos, y trazas de litio y berilio. Durante millones de años después de la gran explosión, no se crearon nuevos núcleos hasta que el hidrógeno comenzó a agotarse en el centro de la estrella y de esta manera cesó la fusión nuclear y se inhibió la expansión, lo que provocó un aumento de temperatura, calentando las capas externas y expandiéndolas, fenómeno conocido como gigante roja. Actualmente, se tiene conocimiento de la generación de los elementos químicos, la cual se realiza inicia con la fusión de hidrógeno para generar helio, y una vez que los núcleos de helio tienen suficiente energía cinética para superar la repulsión electrostática entre ellos, se fusionan para formar un solo carbono. Posteriormente, el planeta se enfrió y el hidrógeno y el helio se unieron a elementos más pesados, pero se considera que una gran parte del helio se perdió porque es poco reactivo con otros compuestos. El hidrógeno formó compuestos como el metano (CH₄), amoníaco (NH₃), ácido sulfhídrico (H₂S) y agua (H₂O). Además, en la Tierra recién formada, hubo importantes concentraciones de CO₂.⁴

De esta manera, se considera que el Precámbrico representa el 88% de la historia de la Tierra (4.500 a 570 Ma), en la cual se produjeron varias glaciaciones. La primera glaciación reportada es la Huroniana con una duración de 400 Ma, dividida en tres etapas frías, la cual pudo ser consecuencia de la reducción de metano y la contribución de oxígeno producido por las cianobacterias, debido a que un descenso térmico regula la dinámica de los gases, la cual está regida por la presión, el volumen y la temperatura. La segunda glaciación, a finales del Precámbrico (1.000 a 580 Ma), se extendió por todos los continentes y abarcó incluso, latitudes tropicales. Sin embargo, se desconoce el grosor de la capa de hielo formada sobre los océanos, y los organismos unicelulares se refugiaron en algunos mares tropicales no congelados y en fondos marinos. La magnitud de la glaciación precámbrica convirtió al planeta en lo que hoy se denomina, según Hoffman y Schrag (2002), la Teoría de la Bola de Nieve. Entre las causas que se atribuyen al fenómeno están la destrucción de los gases de invernadero, el enorme albedo planetario, el movimiento de las placas continentales con la conformación del súper continente Rodinia y la eventual fragmentación y dispersión de este.⁸ Con la finalidad de avanzar en el entendimiento de conocer si durante las glaciaciones los organismos del Precámbrico pudieron conservarse, así como haber existido nuevos organismos, se ha evaluado la síntesis de biomorfos en temperaturas ultracongelantes.⁵ En ese trabajo se mostró que la síntesis de los biomorfos es viable a esas temperaturas (Fig. 3).⁵

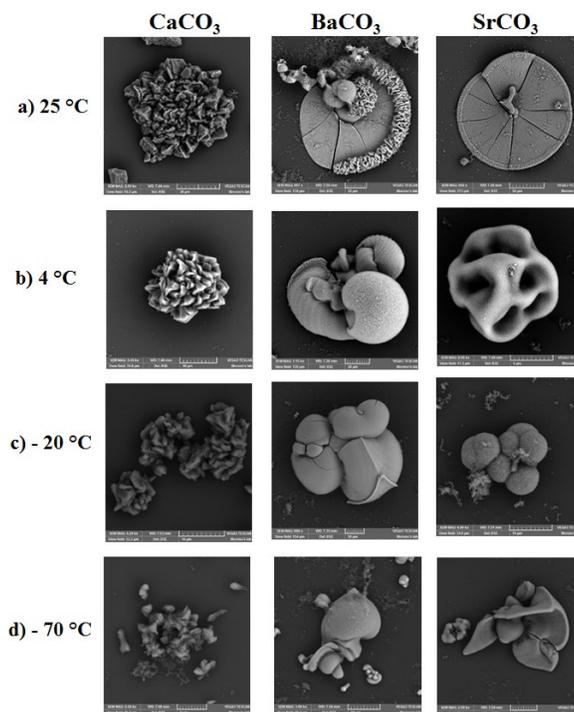


Figura 3. Micrografías por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB) de Biomorfos de CaCO_3 , BaCO_3 y SrCO_3 obtenidos a diferentes temperaturas. Control: (a) 25 °C. Bajo: (b) 4 °C, (c) -20 °C y (d) -70 °C. Tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M. (2021). Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life: Biomorphs as a Study Model. ACS omega, 6(13), 8754-8763.

Como se observa en la figura 3, los biomorfos de CaCO_3 conservan su morfología a todas las temperaturas, esto probablemente es debido a que el CaCO_3 es un mineral polimórfico compuesto por tres fases cristalinas anhidras (calcita, vaterita, y aragonito) y dos fases cristalinas hidratadas (monohidrocalcita e ikaita con seis moléculas de agua) y carbonato cálcico amorfo, característica que posiblemente permite que su estabilidad morfológica y cristalina se conserve en diferentes condiciones atmosféricas.⁵ Esta diferencia polimórfica además conduce a un sistema mucho más complejo de CaCO_3 , lo que conduce a una variedad de posibilidades químicas. Sin embargo, desde el punto de vista fisicoquímico, la calcita es la fase más abundante y termodinámicamente estable en condiciones ambientales, se encuentra comúnmente en la

estructura de especies biológicas y material geológico. Las diferentes morfologías de los biomorfos obtenidos en un intervalo de temperatura de -70°C a 70°C permiten considerar la gran variedad de morfologías que posiblemente fueron adoptadas por los primeros organismos en la era Precámbrica. Es posible que algunas de estas morfologías se perdieron, otras se modificaron y solo algunas se conservaron a lo largo del tiempo y por la consiguiente modificación de las condiciones atmosféricas. Estos datos permiten inferir una correlación, pero hay innumerables interrogantes por resolver sobre el origen de la vida, que solo se lograrán con el esfuerzo conjunto de diversos grupos y áreas de conocimiento.⁴

Períodos posteriores al Precámbrico

A comienzos del Cámbrico, los mares se elevaron, se inició el ciclo de Wilson que cerraría, a finales del Paleozoico, las masas continentales para conformar el Pangea (Wilson, 1963), las cuales se fueron fraccionando a gran velocidad (15 cm/año), comparada con la cifra actual que es de $2,5\text{ cm/año}$, para formar los escudos de Laurentia, Báltica y Siberia hacia el ecuador desde el gran continente austral, Gondwana, al formar la orogénesis panafricana que se extendió desde el polo sur hasta el ecuador. En esta etapa, se produjo la mayor explosión de vida, la cual coincidió con una bonanza climática en un proceso dinámico de co-evolución, aunado a la abundancia de mares someros y abiertos por la separación de las masas continentales, donde la temperatura promedio se estima en 22°C , lo que desencadenó el consecuente aislamiento de especies, las cuales se fueron diversificando filogenéticamente hasta conformar otras nuevas, proceso denominado vicarianza (Mayr, 1976).⁸

Durante el Ordovícico, el desplazamiento de la corteza llegó hasta las porciones australes del globo y se desencadenó una gran glaciación que duró cerca de 20 Ma. A mediados del Silúrico, los hielos se retiraron y de nuevo predominó un clima cálido. Posteriormente, entre el Carbonífero y el Pérmico, se produjo la mayor glaciación del Paleozoico, la cual duró 100 Ma. El inicio del Carbonífero fue cálido; en los bloques continentales situados en torno al ecuador, en gran parte de la antigua América del Norte y de Europa se desarrollaron extensos bosques en ambientes pantanosos que formaron los actuales depósitos de carbón. Paralelamente, se establecieron en las plataformas continentales, abundantes sedimentos calcáreos que pudieron emitir ingentes volúmenes de CO_2 hacia la atmósfera para enfriar el clima de la Tierra. Nuevamente, entre el Carbonífero Medio y el Superior ocurrió otra expansión de glaciares, y descendió el nivel del mar. Así, la génesis y evolución del Pangea produjeron importantes fluctuaciones climáticas, con características áridas en el interior del continente y húmedas o de gran maritimidad hacia los litorales, lo cual ocasionó con ello, la gran extinción del Pérmico (Crowley et al., 1991; Agustí, 1996).⁸

En el Mesozoico (248 a 65 Ma), predominaron los climas cálidos, no hubo ninguna glaciación. Probablemente, la separación de los diversos bloques que constituyeron el Pangea estuvo acompañada de una gran actividad volcánica. Con esta separación, se mitigaron los climas áridos, se volvieron más húmedos y favorecieron un gran desarrollo vegetal. A través del Triásico, Jurásico y Cretácico, la separación de los continentes y la orogénesis fueron colosales, trajeron consigo un efecto fundamental en los climas de la Tierra, denominado sombra orográfica y, en consecuencia, una mayor diversidad de ambientes climáticos que funcionaron como nuevos nichos ecológicos. Finalmente, en el Cenozoico, los continentes continuaron su desplazamiento hasta alcanzar su distribución actual. Lo estructuralmente distinto, respecto a las anteriores etapas geológicas, es la disposición de las celdas de Hadley, las cuales desencadenan la circulación general de la atmósfera, sobre todo en la tropósfera, porción particularmente importante para el desarrollo de la vida. En anteriores eras, el análisis de la disposición, tamaño e intensidad de las celdas, junto con la composición de la atmósfera, podrían aportar datos para comprender los climas de entonces. Asimismo, es importante destacar que cada periodo glacial conlleva alteraciones en la difusión de los gases entre la atmósfera y el océano, al reducir la humedad ambiental y desencadenar importantes sequías. Sin embargo, un aspecto favorable para los organismos terrestres son los puentes intercontinentales que se forman durante las glaciaciones para la radiación de especies hacia otras regiones.⁸

Poder dilucidar la composición química elemental de las primeras células que existieron en la era Precámbrica es fundamental porque ayudaría a comprender la evolución a lo largo de las diferentes épocas. La estabilidad del calcio seguida por el estroncio ha permitido la conservación y evolución de la vida desde la era Precámbrica hasta nuestra era actual. De esta forma, la presencia de estos dos elementos

químicos así como la sílice (en la vida primitiva) y algunas moléculas orgánicas dan origen a una gran variedad de formas de vida⁶. En este sentido, se han sintetizado biomorfos en presencia de ácidos nucleicos a distintas temperaturas.¹ En ese trabajo se encontró que en presencia de gDNA, pDNA o RNA, la morfología, así como la estructura cristalina en la mayoría de los biomorfos se modificó con respecto a los biomorfos sintetizados en ausencia de los ácidos nucleicos.¹ En ese trabajo se encontró que los ácidos nucleicos dirigen la síntesis de los biomorfos a una estructura única y específica para cada una de estas biomoléculas. Además se mostró que los biomorfos obtenidos de calcio, bario o estroncio, corresponden a estructuras cristalinas de CaCO_3 (calcite, aragonite, vaterite), BaCO_3 (witherita), o SrCO_3 (estrontianita) respectivamente (Fig. 4). Estos silico-carbonatos pueden ser un punto de enlace entre la era precámbrica y las eras subsecuentes. Estos datos indican que la presencia de una biomolécula como el ADNg, el ADNp o el ARN son capaces de dirigir la síntesis y el ensamblaje de los biomorfos en formas peculiares y únicas. Este resultado es muy interesante ya que podría ser el primer indicio de que los elementos inorgánicos presentes en la era Precámbrica (en presencia de moléculas orgánicas) dieron lugar a compuestos con morfologías homogéneas que, con el tiempo, se autoorganizaron para finalmente dar origen a la primera célula.¹

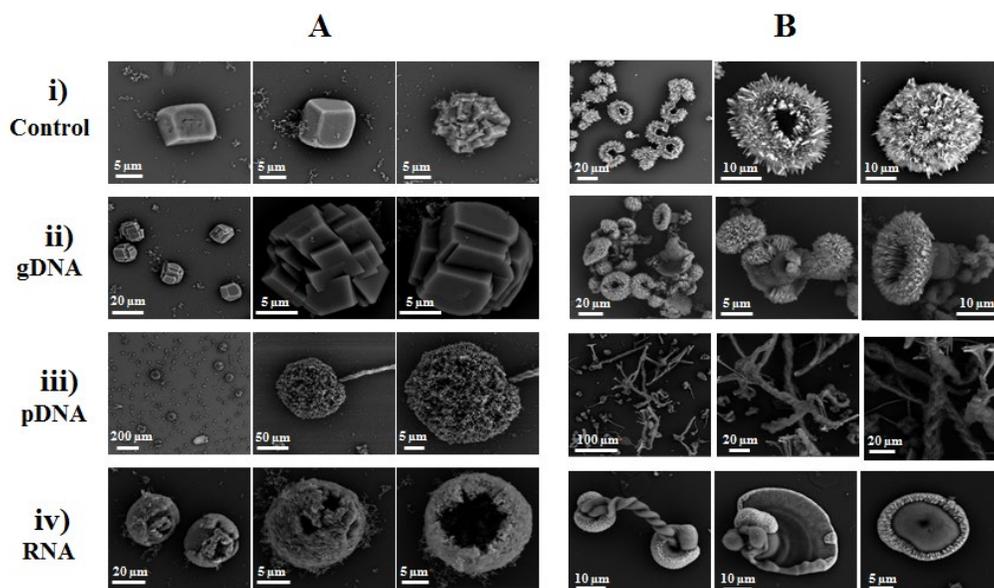


Figura 4. (A, B) Influencia de los ácidos nucleicos en la formación de carbonatos de sílice cálcicos (biomorfos). Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de los biomorfos de sílice-carbonato de calcio en ausencia (i) o presencia de ADN genómico (ii), ADN plasmídico (iii) o ARN (iv). Tomada con permiso de Cuéllar-Cruz, M., Islas, S. R., González, G., & Moreno, A. (2019). Influence of nucleic acids on the synthesis of crystalline Ca (II), Ba (II), and Sr (II) silica-carbonate biomorphs: implications for the chemical origin of life on primitive Earth. *Crystal Growth & Design*, 19(8), 4667-4682.

Conclusiones

La morfología conservada que presentan los biomorfos de los silico-carbonatos de calcio tanto a temperatura ambiente como a temperaturas bajas, sugiere que es una de las estructuras conservadas desde los eventos de glaciación que se suscitaron en la era precámbrica, lo que indica que en la era glacial los microorganismos adoptaron la morfología más estable que posiblemente les permitió sobrevivir en conjunto con otros factores ambientales y su metabolismo desde aquella época hasta nuestros días.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias al financiamiento del Proyecto Número CF19-39216 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México, y del Proyecto-Institucional UGTO-022/2021 de la Universidad de Guanajuato, otorgados a la Dra. Mayra Cuéllar Cruz. Melissa García Fernández e Isis Daniela Romo Franco agradecen la beca otorgada al Programa del XXVI Verano de la Ciencia 2021.

Bibliografía/Referencias

1. Cuéllar-Cruz, M., Islas, S. R., González, G., & Moreno, A. (2019). Influence of nucleic acids on the synthesis of crystalline Ca (II), Ba (II), and Sr (II) silica-carbonate biomorphs: implications for the chemical origin of life on primitive Earth. *Crystal Growth & Design*, *19*(8), 4667-4682.
2. Carnerup, A. (2007). Biomorphs: morphology, chemistry, and implications for the identification of early life.
3. Cuéllar-Cruz, M. y Moreno, A. (2020). Síntesis de biomorfos cristalinos de sílice-carbonato de Ba (II) bajo la presencia de ARN y electrodos ITO cargados positiva y negativamente: obtención de grafito mediante biorreducción de CO₂ y sus implicaciones en el origen químico de la vida en la Tierra primitiva. *ACS omega*, *5*(10), 5460-5469.
4. Cuéllar-Cruz, M. (2021). Influence of Abiotic Factors in the Chemical Origin of Life: Biomorphs as a Study Model. *ACS omega*, *6*(13), 8754-8763.
5. Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., & Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(16), 4105-4110.
6. Cuéllar-Cruz, M. y Moreno, A. (2019). El papel del calcio y el estroncio como los elementos más dominantes durante las combinaciones de diferentes metales alcalinotérreos en la síntesis de biomorfos cristalinos de sílice-carbonato. *Cristales*, *9*(8), 381.
7. Lazcano, A., & Miller, S. L. (1996). The origin and early evolution of life: prebiotic chemistry, the pre-RNA world, and time. *Cell*, *85*(6), 793-798.
8. Sánchez-Santillán, N., Sánchez-Trejo, R., de la Lanza Espino, G., & Garduño, R. (2014). Evolución del clima a través de la historia de la tierra. *Revista Reflexiones*, *93*(1), 121-132.