VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Influencia de los sulfatos en la autoorganización de biomorfos de sílice-carbonato de estroncio y de bario bajo diferentes condiciones fisicoquímicas: implicaciones para el estudio del origen de la vida

Influence of sulfates on the self-organization of silica-carbonate biomorphs under different physicochemical conditions: implications for the study of the origin of life

Juana Laura Sandoval-Ramírez, 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.
*mcuellar@ugto.mx

Resumen

Comprender cómo influyeron las condiciones fisicoquímicas de la Tierra primitiva en los procesos de autoorganización mineral representa un aspecto importante para el estudio del origen de la vida. En el precámbrico la diversidad de ambientes geoquímicos existentes pudo beneficiar diferentes rutas de evolución química antes de la aparición de los primeros sistemas biológicos. Por ello, existen estructuras de interés científico como los biomorfos de sílice-carbonato que implican modelos experimentales útiles para investigar la influencia de dichas condiciones fisicoquímicas en la formación y la organización de estructuras minerales complejas. En este trabajo se evaluó la influencia de los sulfatos sobre la autoorganización de biomorfos sintetizados con Ba^{2+} y Sr^{2+} bajo dos condiciones de temperatura y disponibilidad de CO_2. Además, se realizó una caracterización mediante microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de dispersión enérgica de rayos X (EDS). Se logró observar que la respuesta de los biomorfos frente a la incorporación de sulfatos depende del catión alcalinotérreo y de las condiciones fisicoquímicas del sistema. En conjunto, estos hallazgos nos aportan evidencia de que la composición iónica, la temperatura y la disponibilidad de CO_2 pueden dirigir diferentes trayectorias de autoorganización mineral, lo que refuerza la decisión de emplear biomorfos como modelos experimentales para investigar escenarios geoquímicos de interés en el estudio de la evolución química existente antes de dar paso al origen de la vida.

Palabras clave: biomorfos; autoorganización mineral; sílice-carbonato; sulfatos; origen de la vida.

Introducción

El origen químico de la vida continúa siendo una de las incógnitas científicas más complejas debido a que aún no existe un modelo que explique de manera integral la transición que existe de sistemas químicos abióticos hacia las primeras formas de organización biológica. Diversas disciplinas han intentado resolver esta pregunta, tales como la biología, la química, la física, la geoquímica, la astrobiología, entre otras. Sin embargo, ninguna de ellas por sí sola permite explicar la complejidad de los procesos que condujeron a la aparición de la vida en la Tierra. A lo largo de la historia se han propuesto diversas teorías para explicar el origen de la vida. Una de las primeras hipótesis fue la generación espontánea propuesta por Aristóteles quien tenía una influencia significativa que provocó que dicha creencia prevaleciera desde el siglo IV a.C. hasta el siglo XIX.[1] La idea de que los organismos vivos podrían desarrollarse a partir de materia viva fue refutada por Francisco Redi, pese a los resultados en sus experimentos, el debate persistió ya que no dio respuestas a la generación de los microorganismos. No fue hasta el año de 1886 cuando Pasteur comprobó que esta teoría

[1] Willey, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2008). Prescott, Harley, and Klein's microbiology (7th ed.). McGraw-Hill Higher Education.

estaba equivocada.[2] Tras el rechazo de la generación espontánea, la investigación se orientó hacia modelos basados en la evolución química donde destacan las propuestas de Oparin y Haldane, que fueron respaldadas experimentalmente por Miller y Urey.

Sin embargo, en la actualidad se conoce que el origen de la vida implica la combinación de las condiciones fisicoquímicas en la etapa primigenia de la Tierra. Con la finalidad de comprender estos procesos, numerosos estudios recurren a la recreación experimental de las posibles condiciones geoquímicas y físicas que pudieron haber existido en esa era.[3] Entre las condiciones propuestas para la Tierra primitiva se incluyen radiación UV y fenómenos atmosféricos como tormentas eléctricas, temperaturas elevadas, impactos de cometas, intensa actividad volcánica y superficies minerales capaces de catalizar reacciones químicas. Estas condiciones permitieron el desarrollo de ambientes geoquímicos dinámicos donde pudieron ocurrir procesos de síntesis y organización molecular. Se estima que James Walker realizó estudios independientes donde una atmósfera primitiva se componía principalmente por CO_2 y N_2, ausencia de O_2 y presencia de H_2. Actualmente, según la teoría de Oparin, la atmósfera era reductora; sin embargo, se demostró que existía una pérdida de gases reductores que provocaban un entorno débil reductor, en el que gases como el CO_2 dominaron la atmósfera de la Tierra primitiva.[4] Adicionalmente, se ha reportado que en el Precámbrico los minerales estaban presentes y probablemente actuaron como microambientes capaces de concentrar moléculas presentes en solución al favorecer procesos de adsorción y concentración molecular. Esto debido a que algunos minerales presentan actividad catalítica e intercambio iónico, capaces de acelerar reacciones químicas o modificar la estabilidad de estas. Al tener estas propiedades fisicoquímicas, los minerales comenzaron a ser considerados candidatos importantes para explicar las primeras etapas de la evolución química y autoorganización molecular que corresponde a la capacidad de un sistema para generar patrones organizados a partir de interacciones locales entre sus componentes sin requerir un control externo. Este fenómeno es indispensable para la comprensión del desarrollo de estructuras minerales complejas en ausencia de procesos biológicos como los sistemas de sílice-carbonato.[5]

Dentro de estos destacan los sistemas mencionados anteriormente, que se caracterizan por desarrollar estructuras altamente organizadas mediante procesos inorgánicos. Estas contienen un grado de complejidad morfológica que despierta interés en áreas como la cristalografía, la ciencia de materiales y la química prebiótica. También son llamados biomorfos de sílice-carbonato que son agregados cristalinos resultantes de la precipitación de carbonatos de bario o estroncio en ambientes alcalinos ricos en sílice, pero para que este proceso sea posible, debe existir un equilibrio dinámico entre la precipitación del carbonato y la polimerización de la sílice. Su formación se produce principalmente por autoorganización donde la precipitación de carbonatos y la polimerización de la sílice ocurre de manera simultánea. La interacción entre ambos procesos modifica el crecimiento cristalino convencional de los carbonatos y favorece el desarrollo de estructuras complejas.[6]

Estos cristales presentan morfologías que se asemejan a estructuras propias de organismos vivos a pesar de ser materiales autoensamblados de origen totalmente inorgánico. Diversos estudios han señalado que los biomorfos no solo imitan la morfología, sino que también pueden reproducir algunas señales geoquímicas observadas en microfósiles putativos encontrados en jaspes arcaicos.[7] Entre los biomorfos más estudiados destacan aquellos formados por carbonatos de metales alcalinotérreos, en especial bario y estroncio, gracias a su amplia diversidad morfológica y su elevada sensibilidad a cambios en las condiciones del medio.[3] Los

---

[2] Cuéllar Cruz, M. (2024). The equation of the origin of life in the Universe (Part II): The combination of chemical elements does not determine the emergence of life on Earth. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 70, 100625. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2024.100625

[3] Cuéllar Cruz, M., Ramírez-Cardona, M., Islas, S. R., & Moreno, A. (2022). Influence of different types of clay minerals on the shape and form of silica-carbonates (biomorphs) of Ca(II), Ba(II), and Sr(II). ACS Earth and Space Chemistry, 6(12), 3054–3065. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00277

[4] Pla-García, J., & Menor-Salván, C. (2017). La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra. Anales de Química, 113(1), 16–26.

[5] Rimola, A., Sodupe, M., & Ugliengo, P. (2019). Role of mineral surfaces in prebiotic chemical evolution: In silico quantum mechanical studies. Life, 9(1), Article 10. https://doi.org/10.3390/life9010010

[6] García-Ruiz, J. M., Melero-García, E., & Hyde, S. T. (2009). Morphogenesis of self-assembled nanocrystalline materials of barium carbonate and silica. Science, 323(5912), 362–365. https://doi.org/10.1126/science.1157972

[7] García-Ruiz, J. M., Nakouzi, E., Kotopoulou, E., Tamborrino, L., & Steinbock, O. (2017). *Biomimetic mineral self-organization from silica-rich spring waters*. *Science Advances*, *3*(3), e1602285. https://doi.org/10.1126/sciadv.1602285

biomorfos se consideran un modelo experimental adecuado para evaluar la influencia de diferentes variables fisicoquímicas, como el pH, la concentración de sílice, la disponibilidad del CO_2, la temperatura y la naturaleza del catión presente. De manera específica, la variación de temperatura provoca modificaciones en la velocidad de todos los procesos que se llevan a cabo durante la formación de las estructuras. De esta manera, la disponibilidad de CO_2 puede provocar cambios directos en las morfologías. Al actuar como una fuente de carbonato durante la precipitación, su disponibilidad no es constante, y controla la precipitación de los carbonatos de bario y estroncio, además de influir en la velocidad de formación de nuevos núcleos.[8]

Además de la temperatura, la disponibilidad de CO_2 y la naturaleza del catión, la composición iónica del medio es un factor que puede modificar los procesos de nucleación y crecimiento cristalino.[9] Particularmente, los iones sulfato, que están presentes en diversos ambientes geológicos. Estos pueden modificar la cinética de precipitación de los carbonatos e influir en la organización estructural de los biomorfos. Por ello, su estudio resulta de interés para comprender el efecto de distintas especies iónicas sobre los procesos de autoorganización mineral.[10]

Sin embargo, a pesar de los avances en la comprensión de los biomorfos de sílice-carbonato, aún es necesario conocer cómo determinadas condiciones fisicoquímicas influyen en su formación y diversidad morfológica, particularmente en escenarios relacionados con la química prebiótica. Con la finalidad de avanzar en este área, enl objetivo del presente estudio fue evaluar la formación de estas estructuras utilizando bario y estroncio como cationes alcalinotérreos, en ausencia y presencia de sulfatos, bajo dos condiciones experimentales de temperatura y disponibilidad de CO_2, con el objetivo de analizar la influencia de estas variables sobre su morfología y aportar información al estudio de modelos minerales relacionados con el origen químico de la vida.

Materiales y métodos

1. Síntesis de biomorfos

Los biomorfos de sílice-carbonato se sintetizaron utilizando soluciones de metasilicato de sodio, cloruro de bario ($BaCl_2$, 20 mM) o cloruro de estroncio ($SrCl_2$, 20 mM), adicionando o no sulfato de sodio (Na_2SO_4, 0.10 M). El pH de las mezclas de reacción se ajustó con NaOH. La síntesis se realizó en celdas de reacción construidas dentro de cajas Petri, utilizando pequeños portaobjetos de vidrio colocados sobre soportes plásticos, en los que se depositaron directamente las mezclas. Se evaluaron las siguientes condiciones experimentales: un sistema control, en ausencia de sulfatos, y un sistema suplementado con Na_2SO_4, incubados a 37°C bajo CO_2 ambiental y a 50°C con una atmósfera controlada de 5% de CO_2. Todas las condiciones experimentales se realizaron por duplicado. Las mezclas de sintesis se homogeneizaron suavemente y se incubaron durante 24 h a las temperaturas previamente descritas. Finalizado el periodo de incubación, los portaobjetos se lavaron secuencialmente con agua desionizada estéril, seguido de etanol al 70% y finalmente con etanol al 96%, eliminando posteriormente el exceso de solvente sobre papel absorbente antes de su caracterización.

2. Caracterización morfológica

La caracterización morfológica de los biomorfos se realizó mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE – SEM) utilizando un microscopio Zeiss Sigma HD VP. Previamente, las muestras se montaron sobre cinta de carbón y se recubrieron con una fina capa de oro mediante recubrimiento para minimizar la acumulación de carga electrostática durante el análisis. Las micrografías empleadas para el análisis morfológico se obtuvieron utilizando un detector de electrones secundarios (SE) con un voltaje de aceleración de 2kV, seleccionándose imágenes representativas de cada condición experimental.

---

[8] Cuéllar Cruz, M., Schneider, D. K., Stojanoff, V., Islas, S. R., Sánchez-Puig, N., Arreguín-Espinosa, R., Delgado, J. M., & Moreno, A. (2020). Formation of crystalline silica-carbonate biomorphs of alkaline earth metals (Ca, Ba, Sr) from ambient to low temperatures: Chemical implications during the primitive Earth's life. Crystal Growth & Design, 20(2), 1186–1195. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01315

[9] Cuéllar Cruz, M., Zúñiga-Estrada, E. A., Zúñiga-Estrada, M. A., Islas, S. R., & Moreno, A. (2025). Self-induced crystalline morphology at the mineral–fluid interface: Silica–carbonate biomorphs of alkaline earth metals as a case study. Applied Sciences, 15(9), 4593. https://doi.org/10.3390/app15094593

[10] Piña, C. M., Fernández-Díaz, L., Prieto, M., Putnis, A., & Putnis, C. V. (2004). Crystallisation of strontium sulphates from Si-bearing aqueous solutions: Insights for silica-induced mineralization in natural alkaline springs. Chemical Geology, 204(1–2), 145–156.

3. *Análisis elemental*

Con el fin de complementar la caracterización morfológica, se seleccionaron, a partir de las micrografías SE, biomorfos representativos de cada condición experimental para realizar el análisis elemental. Las regiones de interés fueron localizadas mediante imágenes obtenidas con un detector de electrones retrodispersados de ángulo selecto (AsB), utilizando un voltaje de aceleración de 9kV. Posteriormente, la composición elemental y la distribución espacial de los principales elementos presentes en los biomorfos se determinaron mediante espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), empleando un detector Bruker Nano XFlash 6130 acoplado al FE-SEM. A partir de este análisis se obtuvieron los espectros de composición elemental y los mapas de distribución utilizados para la evaluación de la composición química de las muestras.

Resultados y discusión

Con el propósito de evaluar la influencia de los sulfatos sobre la formación de biomorfos de sílice-carbonato, se analizaron muestras sintetizadas con Ba^{2+} y Sr^{2+} bajo dos condiciones experimentales de temperatura y disponibilidad de CO_2, además de la ausencia y presencia de sulfatos.

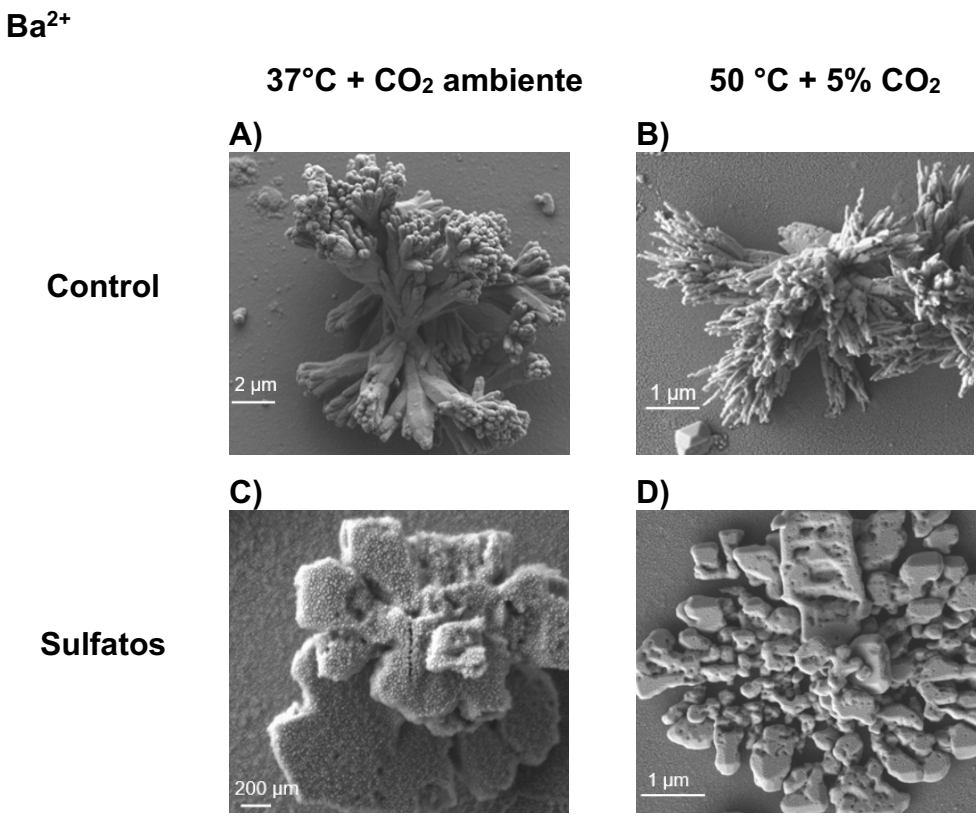


Figura 1. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con Ba^{2+} en ausencia (control) y presencia de sulfatos bajo dos condiciones experimentales: 37°C con CO_2 ambiente y 50°C con 5% de CO_2. (A) Control, 37°C +CO_2 ambiente. (B) Control, 50°C +5% CO_2. (C) Presencia de sulfatos, 37°C + CO_2 ambiente. (D) Presencia de sulfatos, 50°C + 5% CO_2.

Las micrografías SEM obtenidas para los sistemas sintetizados con Ba^{2+}, evidenciaron diferencias morfológicas entre las muestras control y aquellas sintetizadas en presencia de sulfatos bajo ambas condiciones experimentales (Figura 1). En ausencia de sulfatos, las estructuras desarrolladas a 37°C con CO_2 ambiente presentaron morfologías ramificadas, semejantes a flores o corales. Por otro lado, la condición

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

de 50°C con 5% CO_2 conservó el patrón ramificado, aunque existen diferencias en la longitud y la orientación de las ramificaciones, características de biomorfos bien desarrollados. En contraste, las muestras sintetizadas en presencia de sulfatos exhibieron una modificación evidente de la morfología, predominan estructuras laminares y agregados cristalinos compactos de aspecto foliar con morfología subredondeada e irregular, además presentan superficies porosas y algunos cristales muestran caras planas definidas.

Las diferencias observadas entre los sistemas control y los sintetizados en presencia de sulfatos sugieren que la incorporación de estos iones modificó el proceso de crecimiento cristalino durante la formación de los biomorfos[10]. De igual manera, las condiciones de 37°C con CO_2 y 50°C con 5% de CO_2 evidencian que la temperatura y la disponibilidad de CO_2 también influyen en el desarrollo de los sistemas. Las variables mencionadas participan directamente en la velocidad de precipitación del carbonato y en la polimerización de la sílice, que son los procesos determinantes en el crecimiento y la organización final de las estructuras obtenidas.[6] Aunque en ambas condiciones se obtuvieron morfologías definidas en ausencia de sulfatos, existen cambios en la disposición y la longitud de las ramificaciones que sugieren ciertas modificaciones en la dinámica de crecimiento que son asociadas a las condiciones experimentales empleadas.[9]

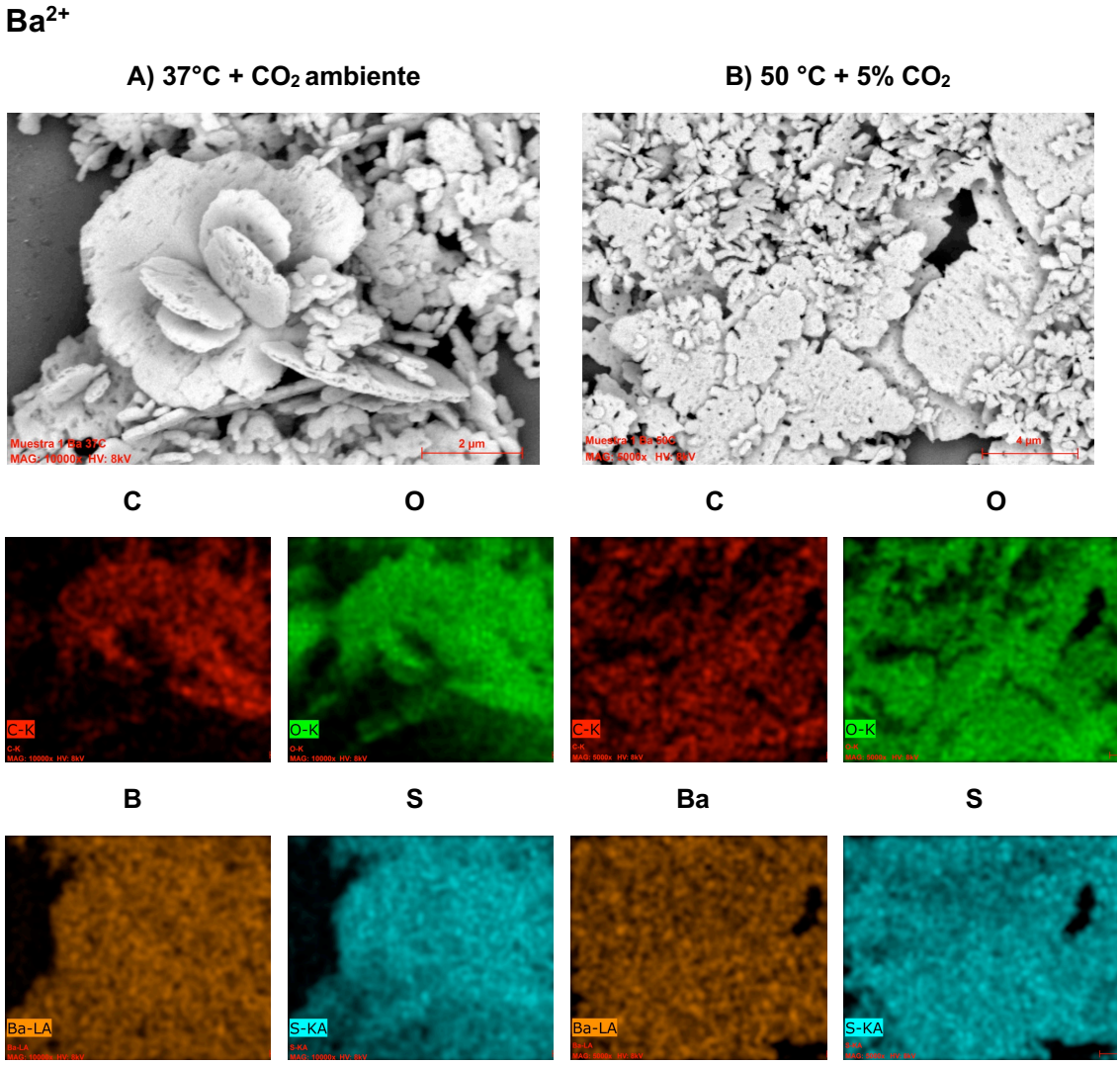


*Figura 2. Caracterización elemental mediante microscopía electrónica de barrido y mapeo EDS de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con BA^{2+} en presencia de sulfatos. A) Biomorfo obtenido a 37°C bajo CO_2 ambiente. B) Biomorfo obtenido a 50°C con 5% de CO_2. En cada condición se muestra la imagen AsB de la estructura seleccionada y los mapas elementales correspondientes a **C**, **O**, **Ba** y **S**.*

***Tabla 1**. Composición elemental obtenida mediante EDS de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con Ba^{2+} en presencia de sulfatos.*

Elemento	*37°C + CO_2 ambiente (wt. %)*	*50°C + 5% CO_2 (wt. %)*
Carbono	1.04	1.31
Oxígeno	24.38	25.03
Sodio	0.41	0.47
Silicio	1.60	1.68
Azufre	11.21	12.10
Bario	61.36	59.40

Como complemento del análisis morfológico, se realizó una caracterización elemental mediante EDS donde se seleccionaron biomorfos representativos sintetizados en presencia de sulfatos bajo ambas condiciones experimentales. Los mapas elementales mostraron la distribución de carbono (C), oxígeno (O), bario (Ba) y azufre (S) sobre las estructuras analizadas (Figura 2), mientras que el análisis cuantitativo (Tabla 1) indicó que el bario fue el elemento predominante en ambas condiciones experimentales, con porcentajes en peso de 61.36% y 59.40% para 37°C con CO_2 ambiente y 50°C con 5% de CO_2, respectivamente. De igual manera, la detección de azufre en ambas muestras (11.21% y 12.10%) fue consistente con la presencia de sulfatos durante la síntesis. Debido a que el análisis EDS por sí solo no permite detectar la fase química específica del azufre, estos resultados deben interpretarse como evidencia elemental y no como una confirmación directa de la incorporación estructural del sulfato en la red cristalina formada.[9] Adicionalmente, la pérdida del patrón ramificado observada en el SEM y la detección del azufre en los biomorfos sugieren que la composición iónica del medio influyó en los procesos de nucleación y crecimiento cristalino del sistema sílice-carbonato de bario.[9]

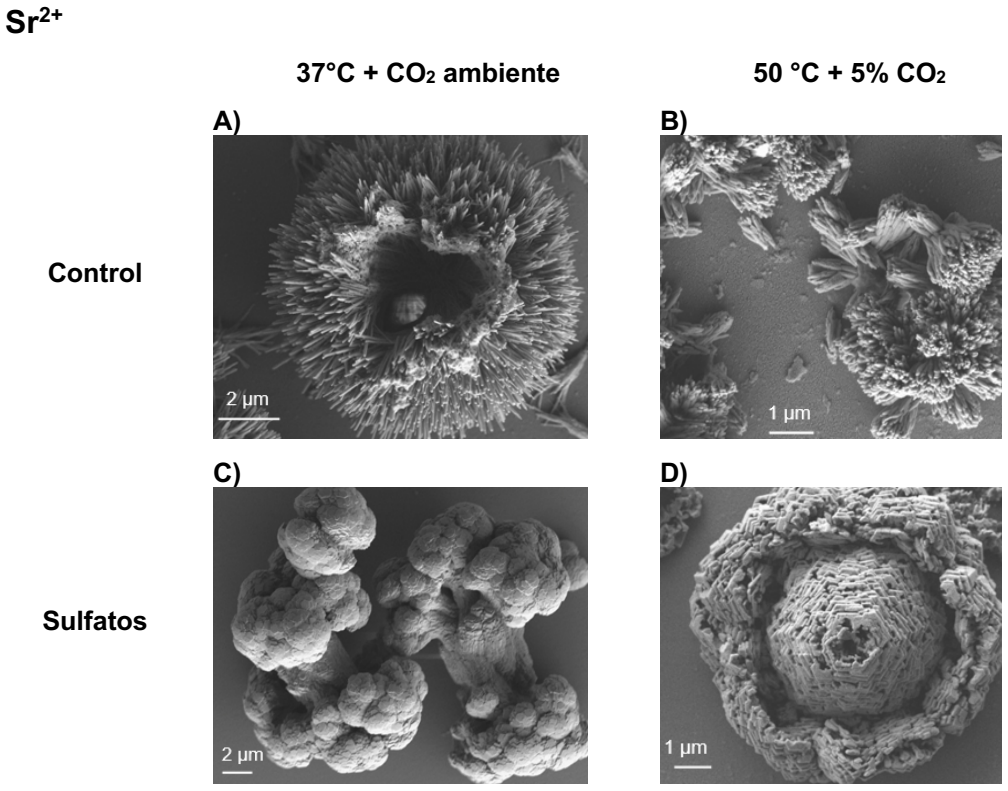


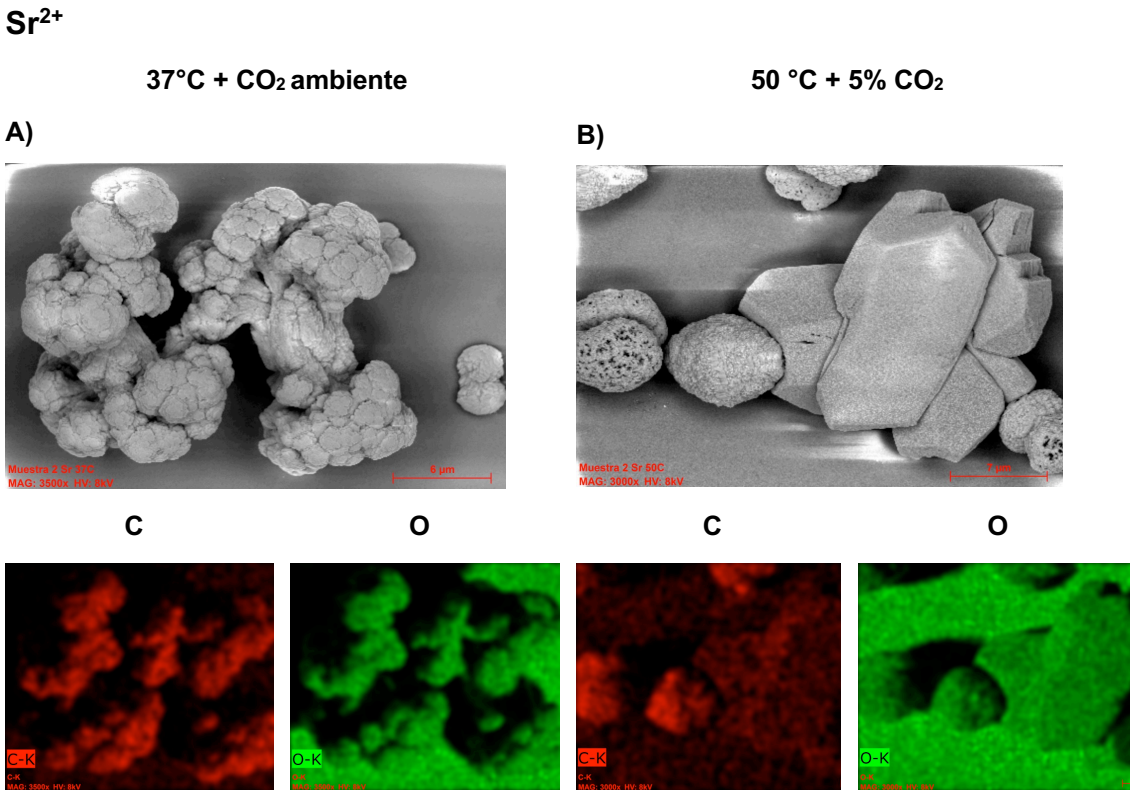
***Figura 3.** Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con Sr^{2+} bajo diferentes condiciones de temperatura, disponibilidad de CO_2 y presencia de sulfatos. A) Control sintetizado a 37°C bajo CO_2 ambiente. B) Control*

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

sintetizado a 50°C con 5% de CO_2. C) Biomorfos sintetizados en presencia de sulfatos a 37°C bajo CO_2 ambiente. D) Biomorfos sintetizados en presencia de sulfatos a 50°C con 5% de CO_2.

Las micrografías SEM adquiridas para los sistemas con Sr^{2+} también evidenciaron diferencias morfológicas entre las muestras control y aquellas sintetizadas en presencia de sulfatos bajo ambas condiciones experimentales (Figura 3). En ausencia de sulfatos, los biomorfos obtenidos a 37°C con CO_2 del ambiente presentaron estructuras altamente ramificadas con crecimiento radial, mientras que la condición de 50°C con 5% de CO_2 conservó este patrón general, aunque con agregados más compactos y una menor simetría en las ramificaciones. En cambio, la presencia de sulfatos favoreció notablemente la morfología de los biomorfos. A 37°C se observaron agregados globulares con superficie rugosa y aspecto nodular, mientras que a 50°C se desarrollaron estructuras concéntricas con disposición laminar, evidenciando un patrón de organización diferente al observado en las muestras control.

Mientras que en las estructuras de bario predominó la formación de agregados compactos con una marcada disminución del patrón ramificado, en los biomorfos de Sr^{2+} la presencia de sulfatos favoreció una reorganización del crecimiento, dando lugar a estructuras globulares y morfologías concéntricas más complejas. Este comportamiento indica que la respuesta del sistema frente a la incorporación de especies iónicas depende de la naturaleza del catión alcalinotérreo. De manera similar, el cambio entre las condiciones experimentales de 37°C con CO_2 ambiente y 50°C con 5% de CO_2 sugieren que la temperatura y la disponibilidad del CO_2 continúan desempeñando un papel importante en el desarrollo de estas estructuras, al influir sobre la velocidad de nucleación y crecimiento cristalino.[9]



VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

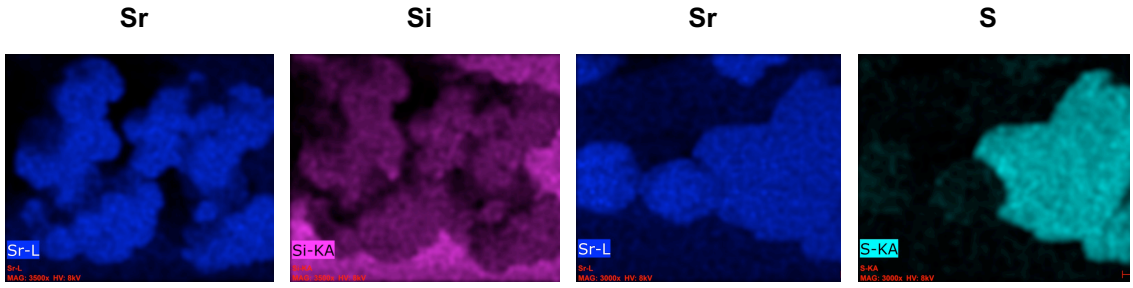


*Figura 4. Caracterización elemental mediante imagen AsB y mapeo EDS de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con Sr^{2+} en presencia de sulfatos. (A) Estructura representativa obtenida a 37°C bajo CO_2 ambiente. (B) Estructura representativa obtenida a 50°C con 5% de CO_2. Para cada condición se presenta la imagen AsB utilizada para el análisis y los mapas de distribución elemental correspondientes a **C**, **O**, **Sr** y al cuarto elemento analizado (**silicio** en A y **azufre** en B).*

***Tabla 2**. Composición elemental obtenida mediante EDS de biomorfos de sílice-carbonato sintetizados con Sr^{2+} en presencia de sulfatos*

Elemento	*37°C + CO_2 ambiente (wt. %)*	*50°C + 5% CO_2 (wt. %)*
Carbono	8.59	8.12
Oxígeno	29.66	30.87
Sodio	0.23	0.13
Estroncio	61.53	60.88

Se seleccionaron biomorfos representativos sintetizados en presencia de sulfatos para llevar a cabo el análisis elemental mediante EDS. Los mapas elementales confirmaron la distribución de los principales elementos presentes en las estructuras analizadas (Figura 4), mientras que el análisis cuantitativo (Tabla 2) mostró que el Sr^{2+} fue el elemento predominante en ambas condiciones experimentales, con porcentajes en peso de 61.53% para la condición de 37°C con CO_2 ambiente y 60.88% para 50°C con 5% de CO_2. Igualmente, las variaciones observadas en los porcentajes de carbono, oxígeno y sodio fueron mínimas entre ambas condiciones, lo que indica que la composición elemental global permaneció similar.

En la condición de 37°C con CO_2 ambiente, el mapeo elemental incluyó la distribución de C, O, Sr y Si, mientras que para la condición de 50°C con 5% de CO_2 se obtuvo la distribución de C, O, Sr y S. Aunque los elementos representados difieren entre ambas condiciones debido a la información disponible, los mapas permitieron visualizar la presencia y distribución homogénea de los elementos analizados sobre las estructuras seleccionadas. La ausencia de una señal detectable de azufre en las muestras analizadas a 37°C con CO_2 del ambiente sugiere que, bajo estas condiciones, la asociación del sulfato con las estructuras sintetizadas fue limitada o no fue detectada mediante EDS.[9]

En conjunto, la incorporación de sulfatos modificó la autoorganización de los biomorfos de sílice-carbonato. Sin embargo, el efecto no fue uniforme entre los sistemas de Ba^{2+} y Sr^{2+}. En el caso del bario, la presencia de sulfatos se asoció con una disminución del patrón ramificado y con la formación de agregados cristalinos más compactos, lo que sugiere una alteración en la dinámica de crecimiento del carbonato de bario.[9] En contraste, en el sistema de estroncio, los sulfatos no solo modificaron la morfología, sino que favorecieron una reorganización estructural distinta, dando lugar a formas globulares y concéntricas. Esto indica que la respuesta de los agregados frente a los sulfatos depende de la naturaleza del catión alcalinotérreo presente.

La diferencia entre ambos sistemas puede relacionarse con las propiedades fisicoquímicas propias de Ba^{2+} y Sr^{2+}, como su comportamiento durante la precipitación de carbonatos, su interacción con especies iónicas presentes en el medio y la estabilidad de las fases minerales formadas.[9] Aunque ambos cationes pertenecen al grupo de los alcalinotérreos, no necesariamente responden de la misma manera ante la incorporación de sulfatos al sistema. Por ello, los resultados sugieren que los sulfatos no actúan únicamente como una especie adicional en solución, sino como un factor capaz de dirigir de manera distinta las trayectorias de nucleación y crecimiento cristalino según del catión involucrado.[9]

La temperatura y la disponibilidad de CO_2 también desempeñaron un papel importante en el proceso de autoorganización de los biomorfos. La condición de 50°C con 5% de CO_2 favoreció cambios morfológicos más evidentes respecto a la condición de 37°C con CO_2 ambiente, lo que sugiere que un aumento de temperatura y la disponibilidad de carbonato puede modificar la velocidad de nucleación, precipitación y crecimiento cristalino. En este sentido, las condiciones que simulan un ambiente con mayor disponibilidad de CO_2 parecen favorecer una interacción más marcada entre las especies iónicas presentes en el sistema, particularmente en el caso del Sr^{2+}, donde la señal de azufre se asoció únicamente con la condición de 50°C.[8] Los resultados sugieren que la autoorganización de biomorfos de sílice-carbonato no depende únicamente de la presencia del catión alcalinotérreo, sino de la interacción entre el catión, los sulfatos y las condiciones fisicoquímicas del medio. La presencia de sulfatos puede alterar el equilibrio entre la precipitación del carbonato y la polimerización de la sílice, mientras que la temperatura y el CO_2 modulan la velocidad y dirección del crecimiento cristalino. Por lo tanto, los biomorfos obtenidos evidencian que pequeñas variaciones en la composición iónica y ambiental del sistema pueden conducir a patrones morfológicos distintos, lo cual refuerza su utilidad como modelos experimentales para estudiar procesos de autoorganización mineral relacionados con la química prebiótica.[9] En este contexto, los resultados apoyan la idea de que la heterogeneidad ambiental característica de la Tierra primitiva pudo favorecer la generación de diversos escenarios de autoorganización mineral, proporcionando una mayor variedad de superficies y microestructuras potencialmente relevantes para procesos químicos asociados al origen de la vida.

Conclusión

La incorporación de sulfatos modifica la autoorganización de biomorfos de sílice-carbonato de manera dependiente del catión alcalinotérreo y en las condiciones fisicoquímicas de síntesis. La respuesta diferencial observada entre los sistemas de Ba^{2+} y Sr^{2+} pone de manifiesto la sensibilidad de estos sistemas frente a variaciones en la composición iónica del medio. Por lo que, los biomorfos constituyen un modelo experimental útil para explorar cómo distintos escenarios geoquímicos pudieron influir en el proceso de autoorganización mineral asociados con la evolución química previa al origen de la vida.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo financiero otorgado a Mayra Cuéllar Cruz mediante el Proyecto No. CBF-2025-I-174 de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Juana Laura Sandoval Ramírez agradece la beca otorgada por el Programa del XXXI Verano de la Ciencia 2026 de la Universidad de Guanajuato.

Bibliografía/Referencias

Cuéllar-Cruz, M. (2024). The equation of the origin of life in the Universe (Part II): The combination of chemical elements does not determine the emergence of life on Earth. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 70, 100625. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2024.100625

Cuéllar-Cruz, M., Ramírez-Cardona, M., Islas, S. R., & Moreno, A. (2022). Influence of different types of clay minerals on the shape and form of silica-carbonates (biomorphs) of Ca (II), Ba (II), and Sr (II). ACS Earth and Space Chemistry, 6(12), 3054–3065. https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00277

Cuéllar-Cruz, M., Schneider, D. K., Stojanoff, V., Islas, S. R., Sánchez-Puig, N., Arreguín-Espinosa, R., Delgado, J. M., & Moreno, A. (2020). Formation of crystalline silica-carbonate biomorphs of alkaline earth metals (Ca, Ba, Sr) from ambient to low temperatures: Chemical implications during the primitive Earth's life. Crystal Growth & Design, 20(2), 1186–1195. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01315

Cuéllar-Cruz, M., Zúñiga-Estrada, E. A., Zúñiga-Estrada, M. A., Islas, S. R., & Moreno, A. (2025). Self-induced crystalline morphology at the mineral–fluid interface: Silica–carbonate biomorphs of alkaline earth metals as a case study. Applied Sciences, 15(9), 4593. https://doi.org/10.3390/app15094593

García-Ruiz, J. M., Melero-García, E., & Hyde, S. T. (2009). Morphogenesis of self-assembled nanocrystalline materials of barium carbonate and silica. Science, 323(5912), 362–365. https://doi.org/10.1126/science.1157972

García-Ruiz, J. M., Nakouzi, E., Kotopoulou, E., Tamborrino, L., & Steinbock, O. (2017). Biomimetic mineral self-organization from silica-rich spring waters. Science Advances, 3(3), e1602285. https://doi.org/10.1126/sciadv.1602285

Piña, C. M., Fernández-Díaz, L., Prieto, M., Putnis, A., & Putnis, C. V. (2004). Crystallisation of strontium sulphates from Si-bearing aqueous solutions: Insights for silica-induced mineralization in natural alkaline springs. Chemical Geology, 204(1–2), 145–156.

Pla-García, J., & Menor-Salván, C. (2017). La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra. Anales de Química, 113(1), 16–26.

Rimola, A., Sodupe, M., & Ugliengo, P. (2019). Role of mineral surfaces in prebiotic chemical evolution: In silico quantum mechanical studies. Life, 9(1), Article 10. https://doi.org/10.3390/life9010010

Willey, J. M., Sherwood, L. M., & Woolverton, C. J. (2008). Prescott, Harley, and Klein's microbiology (7th ed.). McGraw-Hill Higher Education.