

Similitudes y diferencias entre los cherts, diatomeas y radiolarios con respecto a los silico-carbonatos de Ca(II), Ba(II) y Sr(II)

María del Sagrario Caroline Arteaga Domínguez¹, Emilie Pantoja Saldaña¹, Mayra Cuéllar Cruz²

¹Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato. Guanajuato, México.

²Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas. Campus Guanajuato Universidad de Guanajuato. Noria Alta S/N, Col. Noria Alta C.P. 36050. Guanajuato, México. mcuellar@ugto.mx²

Resumen

El origen de la vida ha sido una gran incógnita para el ser humano y a lo largo de la historia se han propuesto diversas teorías para explicar el comienzo de la vida en nuestro planeta. Con el avance del tiempo y de la ciencia, se descubrió que la vida comenzó en la era precámbrica, aproximadamente hace 3600 millones de años atrás; es una de las eras más largas que ocurrieron en el planeta. En este tiempo ocurrieron muchos cambios geológicos, incluyendo la aparición de cherts, biomorfos y diatomeas. Se ha planteado que estos biomorfos pueden estar relacionados en el origen químico de la vida. El objetivo del presente artículo es analizar las similitudes y diferencias entre los biomorfos con respecto a los radiolarios, las diatomeas y los cherts.

Palabras clave: Cherts, Biomorfos, Diatomeas, Radiolarios

Introducción

¿Cómo y cuándo se originó la vida?. A lo largo de los siglos, muchos científicos han debatido la respuesta a esta incógnita. Dar una respuesta concreta ha sido particularmente complicado, puesto que se sigue un proceso, no un momento espontáneo en que la materia cobró vida. Es así que, como réplica, después de diversos estudios se ha consensado que la vida tuvo su origen en la era Precámbrica, hace aproximadamente 3500 millones de años. Esta etapa geológica se caracterizó por la formación de la protoatmósfera y el caldo nutritivo, cuyos componentes químicos abióticos, carácter reductor, condiciones extremas y constante intercambio eléctrico propiciaron las circunstancias necesarias para la formación de los primeros compuestos orgánicos, biomoléculas y posteriormente las primeras células que evolucionaron hasta la formación de los organismos pluricelulares que ahora existen¹. Mientras, para estimar una respuesta al cómo, es necesario estudiar el origen químico de los primeros compuestos orgánicos, así como de los organismos pioneros que se originaron en aquella época. Se ha encontrado que en nuestra era aún pueden existir microfósiles del Precámbrico, los cuales son denominados cherts. Específicamente los Apex chert representan a varias especies de microfósiles procariontas y con morfología similar a las cianobacterias²⁻⁷, así como a un grupo de organismos oportunamente conservados hasta nuestra era, los radiolarios y las diatomeas. Adicionalmente, existen estructuras inorgánicas formadas por silico-carbonato de calcio, bario o estroncio, denominados biomorfos, los cuales tienen la característica que emulan la estructura de morfologías de diversos organismos, algunas de esas morfologías son semejantes a algunos de los microfósiles encontrados en los cherts del precámbrico^{2,7-11}.

Debido a que las estructuras de los biomorfos presentan alta similitud a las de los cherts, es probable que estos se hayan considerado en su lugar, al momento de datar la formación de la vida. Esta hipótesis se ha sustentado en el hecho de que su síntesis se lleva a cabo bajo condiciones análogas a las terrestres antes de la vida, es decir, en ambientes ricos en sílice, exentos de la interacción de material orgánico y lejos del equilibrio termodinámico.

Con la finalidad de analizar si los biomorfos pueden ser los cherts del Precámbrico, en el presente trabajo se revisarán las similitudes y diferencias entre ambos.

Materiales y métodos

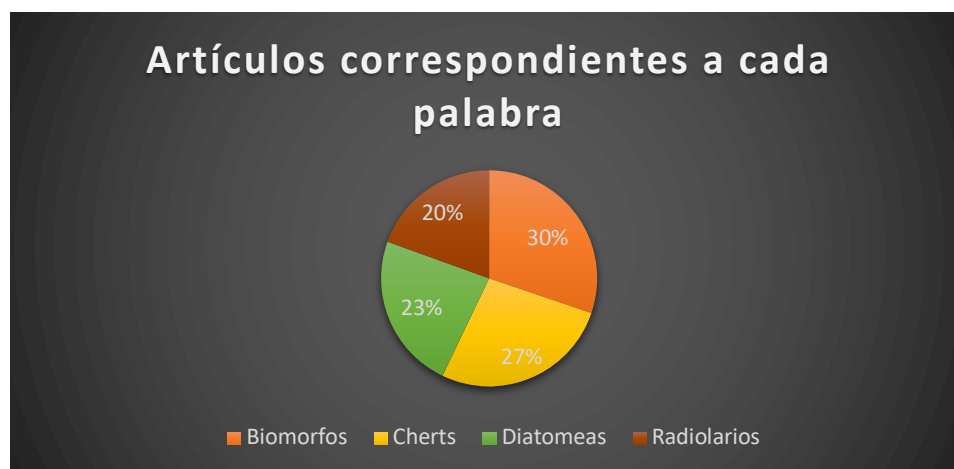
La síntesis de biomorfos silico-carbonatos de bario y estroncio fue realizada en pequeñas placas de vidrio de 3 mm x 5 mm. Para ello se emplearon 100 µl de silicato de sodio en concentración de 1000 ppm y del catión a una concentración de 20 ppm. Además, se adicionó 1.5 µl de NaOH para propiciar el medio alcalino, con un pH entre 10-11. Estas se dejaron sintetizar durante 24 horas.

Adicionalmente, en nuestra investigación para la elaboración de este artículo, hicimos uso de herramientas tecnológicas, tales como libros electrónicos y artículos de divulgación. Las palabras claves que se utilizaron fueron las siguientes: Biomorfos, Cherts, Diatomeas, Radiolarios. En esta búsqueda de información con fines de investigación, obtuvimos un total de 2,288,470 documentos, los cuales de acuerdo con su categoría se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1. Número de resultados de acuerdo con las palabras claves (Biomorfos, Cherts, Diatomeas, Radiolarios) y número

	Biomorfos	Cherts	Diatomeas	Radiolarios
Número de resultados de acuerdo con las palabras claves	9,570 resultados	529,000 resultados	1,700,000 resultados	49,900 resultados
Número de artículos utilizados con la información citada.	9	7	7	6

Con la finalidad de facilitar la búsqueda y descartar fuentes de información se añadió las palabras “artículos científicos” a cada palabra clave. De esta manera, el número de documentos se redujo a 29 artículos, de los cuales el 30% pertenecían a biomorfos, 27% pertenecían a cherts, 23% pertenecían a diatomeas y 20% pertenecían a radiolarios, respectivamente (Gráfica 1).



Gráfica 1. Porcentaje de artículos que contenían cada palabra clave.

Resultados

Cherts

Los cherts se definen como el grupo de minerales de origen silicio encontradas en ecosistemas de alta producción orgánica. Se ha documentado que los cherts se han formado desde la era Precámbrica, hace aproximadamente 3500 millones de años¹². Son considerados como la reminiscencia de microfósiles antiguos. Son rocas sedimentarias químicamente precipitadas compuestas principalmente de cuarzo microcristalino, cuarzo calcedónico y megacuarzo menor. Los cuales están dispuestos principalmente por dióxido de silicio, y otros compuestos menores, tales como magnesio, hierro, potasio, aluminio, manganeso, sodio, níquel, cobre, titanio, estroncio y bario¹³. Se ha sugerido que la mayoría de los cherts de cuarzo se originaron de precursores de opalina, pues se observa una transformación diagenética de ópalo/cuarzo.

Estos provienen de orígenes distintos como pueden ser hidrotermal, detrital, hidrogenético (por precipitación u absorción), sedimentario o por silicificación volcánica¹⁴. Su fuente principal proviene de la sílice disuelta resultante de la meteorización química continental (Fig. 1.)^{15,16}. Los criterios para comprender su origen sedimentario son la aparición de microcuarzo, megacuarzo y cuarzo de calcedonia, una composición rica en oxígeno isotópico (¹⁸O) y la variación de las composiciones de elementos traza junto con ³⁰Si, los cuales participan durante la reorganización de las unidades de sílice en la recrystalización. Esta distinción en su modo de formación es precisamente el distintivo entre los cherts precámbricos y los fanerozoicos, etapa caracterizada por la aparición de radiolarios y diatomeas gracias al cambio de locación de la precipitación de sílice en las profundidades del océano, el pH, la temperatura, presencia de CO₂ y turbulencia marina.

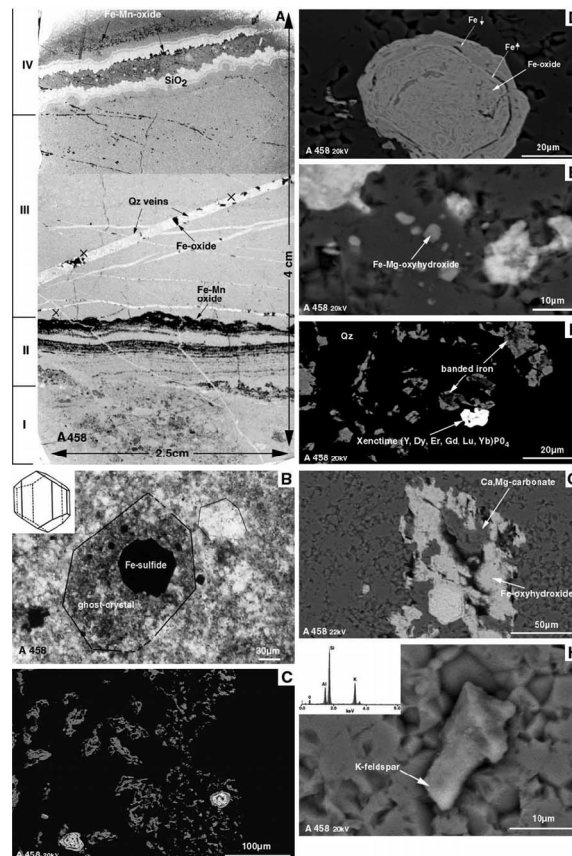


Figura 1. Origen de algunos cherts de la era arcaica. Imagen tomada con permiso de Orberger, B., Rouchon, V., Westall, F., de Vries, S.T., Pinti, D.L., Wagner, C., Wirth, R., Hashizume, K. (2006). Microfacies and origin of some Archean cherts (Pilbara, Australia). *Processes on the Early Earth*, Wolf Uwe Reimold, Roger L. Gibson. DOI: 10.1130/2006.2405(08).

Los cherts radiolarios de la era Jurásica fueron el fruto de un alto afloramiento y productividad biosilíceas en zonas de paleolatitudes subecuatoriales. Se han encontrado mayormente influenciados por las condiciones paleo climáticas antes que los factores diagenéticos (transformación de biosilíceas). Es por esta razón en que se distingue su formación, que no necesariamente requiere grandes cantidades de sílice disuelto como en los biomorfos, inclusive pueden formarse sin la presencia de sílice biogénica. Por ello no son indicadores precisos de la productividad biosilíceas; además la absorción de sílice por sus minerales de arcilla se dio como mecanismo de balanceo del flujo de sílice por las condiciones deficientes de afloramiento del eoceno temprano¹⁷.

Durante el Paleoceno y el Eoceno temprano (era cenozoica), es en donde se ha reportado que se produjeron una cantidad mayor, debido a que se consideran los periodos con las temperaturas más altas en el fondo del océano, determinadas por sus isótopos de sílice y oxígeno. Esto contribuyó a que en su interior se conservaran microfósiles como las diatomeas y los radiolarios, igualmente encontrados en el mar, el cual presentaba concentraciones estimadas de 60 ppm de sílice en el precámbrico¹⁸.

Los cherts pueden dividirse en dos categorías: el bandeado y el nodular. En esta investigación nos centraremos en el bandeado. Este consiste en los cherts formados por sílice, y son asociados con rocas de sedimentos marinos, volcánicos submarinos, rocas verdes almohadilladas, tufas, areniscas pelágicas, pizarras o argilitas y turbiditas siliciclásticas o carbonáticas. Estos tipos de cherts están subdivididos en cuatro subgrupos: depósitos de diatomeas, depósitos de radiolarios, depósitos de espículas silíceas y los cherts bandeados. Cómo parte de nuestra investigación sólo nos centraremos en dos. Los cherts de radiolarios son perfectamente estratificados, y producen un cemento silíceo. Este, se encuentra en rocas volcánicas, arcillas pelágicas y areniscas turbidíticas. Respecto a los depósitos de diatomeas, sólo es masa basal de diatomitas¹³.

Diatomeas

Las diatomeas, también conocidas como algas de cristal, fueron de los primeros microorganismos en aparecer en nuestro planeta, en el periodo proterozoico, aunque otros investigadores aseguran que sus inicios se remontan en el periodo Cretácico hace ~190 Ma¹⁹. Las diatomeas son unas algas minúsculas que están conformadas por una pared celular o frústula, parecida a una burbuja. Esta pared celular está compuesta de silicios. La frústula, está compuesta por dos partes. En la parte superior podemos encontrar la epiteca, y en la parte inferior la hipoteca, éstas son complementarias, igual que un rompecabezas en su interior. Dentro de estas partículas se encuentra la célula²⁰.

Su morfología varía de acuerdo con sus especies, sin embargo, se divide en dos grandes grupos: con forma perfectamente circular (valvas simétricas radialmente) y con forma penadas (valvas simétricas bilateralmente)²¹ (Fig. 2). Estas formas les permiten movimiento. En el caso de las pennadas, sus valvas simétricas bilateralmente ayudan a su movimiento vertical. En ocasiones, existen algunas especies que cuentan con birrafidas, lo cual ocasiona movimientos mayormente variados en estos microorganismos.

Las diatomeas radiadas dependen de setas, espinales, para mantenerse en el agua en movimiento vertical y por medio del anabolismo de lípidos, su densidad disminuye en relación con el agua que los rodea²². Para su desarrollo, las diatomeas requieren de nitrógeno, fósforo y silicio. A su vez, esta morfología se ve afectada por factores climáticos, como temperatura, pH del agua, y factores contaminantes, como insecticidas y desechos industriales²³.

Habitan en su mayoría en sitios acuáticos (por ser algas marinas), en tierra húmeda, en glaciares o sitios con hielo, dependiendo del medio en el que se encuentran, pueden encontrarse de manera individual o en grupo²⁴. Principalmente se encuentran en la superficie, por su baja densidad. Aunque también pueden encontrarse en otros microorganismos, como en algas y rocas, debido a que se han encontrado rastros de ellas en fósiles. Existe una estrecha relación entre las diatomeas y el origen de la vida, debido a que son consideradas como bioindicadores del medio ambiente, ya que son muy sensibles a los cambios climáticos. El océano, los peces y el ser humano dependen en parte de su existencia, ya que proporcionan el 20% del oxígeno, además de que forman parte de la cadena alimenticia de la fauna acuática, por pertenecer a la familia de las algas marinas, entre ellas el kril y el fitoplancton. Su gran prosperidad se debe a la abundancia de los silicarbonatos en nuestro planeta, ya que las diatomeas se encuentran en la mayor parte de los océanos. Son consideradas como un gran indicio del origen de la vida, debido a que son consideradas bioindicadores, podemos pensar que, gracias a su presencia en la antigüedad, pudo haber afectado o tener un papel crucial en la aparición de las primeras formas de vida.

Radiolarios

Son protozoarios holoplantónicos. Se encuentran ampliamente distribuidos por todo el océano, pero en especial en las capas superficiales de áreas de baja latitud por la zona ecuatorial. Su exoesqueleto de cristal está compuesto por silicato amorfo. Su morfología está adaptada a su estilo de vida inmóvil y favorece su flotabilidad, presentan gran diversidad de intrincadas y complejas formas arquitectónicas que incluyen esferas geodésicas y poliedros de combinaciones de sinfín de diseños geométricos caracterizadas por sus abundantes poros y picos (Fig. 2.)²⁵. Algunos de los que habitan en la superficie poseen algas simbióticas y cianobacterias como parte de su mecanismo de alimentación. Así mismo, otros protozoarios, algas, cianobacterias y diatomeas representan una gran fuente de alimento e incluso compiten con estas por los recursos de óxido de silicio. Estos presentan una reproducción asexual, ya que en colonias se observa fisión binaria de las cápsulas centrales.

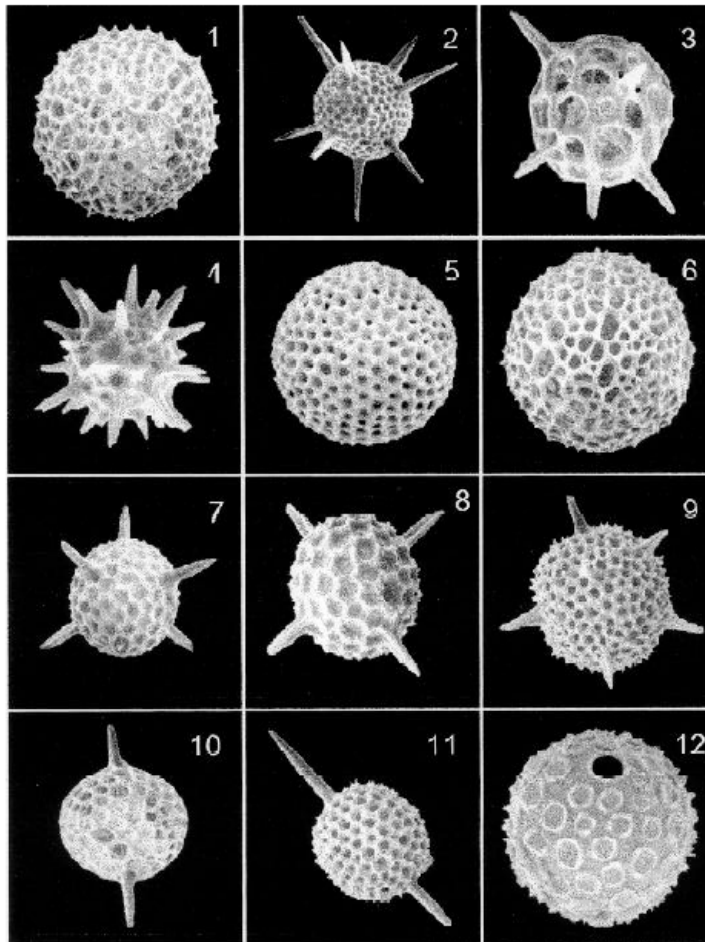


Figura 2. Imágenes de diversos radiolarios: 1: *Actinomma antarcticum* (x 280); 2: *Actinomma* aff. *leptodermum* (x 600); 3: *Actinomma* sp. "A" (x160); 4: *Actinomma* sp. "B" (x 520); 5: *Carposphaera melittomma* (x 480); 6: *Cenosphaera compacta* (x 320); 7: *Hexacontium armatum* (x 380); 8: *Hexacontium armatum* (x 380); 9: *Hexalonche philosophica* (x 380); 10: *Stylacantarium bispiculum* (x 440); 11: *Stylosphaera melpomene* (x 280); 12: *Acrosphaera murrayana* (x 480). Imagen tomada con permiso de Zapata, J., Olivares, J. (2005). *Radiolarios (Protozoa, Actinopoda) sedimentados en el Puerto de Caldera (27°04' S; 70°51' W), Chile*. *Gayana*, 69, 78-93.

Estos organismos unicelulares de alto desarrollo filogenético se encuentran en solitario o en grupos de colonias macroscópicas con diámetros desde milímetros hasta metros unidos mediante redes silíceas o asociados ligeramente en masas gelatinosas. Se estima que su longevidad individual puede alcanzar desde 2 semanas hasta 2 meses²⁶. Al morir pasan a formar parte de los sedimentos biogénicos, proceso activo desde la era cámbrica, por lo cual son útiles para la datación geológica pues forman parte de cienos pelágicos.

Consecuentemente, la mayoría de los radiolarios hoy descritos existen únicamente en forma fósil, mientras que la mayoría de las especies de diatomeas documentadas aún viven²⁷.

Se distinguen de otros protozoarios por una cápsula central que rodea el núcleo y separa el endoplasma (intracápsula/contenido celular) del ectoplasma donde está la extracápsula, una capa periférica de citoplasma que rodea la cápsula central separada por la pared capsular central; además ahí es donde se ubica el esqueleto con el fin de evitar el contacto con el agua salada y evitar su disolución. Características de estas membranas son empleadas para la diferenciación de los diferentes subgrupos²⁸.

Cabe destacar que existe un conocimiento limitado en varios aspectos de la biología en radiolarios, por lo que representa un factor limitante. No obstante, tanto ejemplares vivientes como fosilizados son identificables entre las distintas especies por su morfología esquelética y su patrón de perforaciones, aunque muchas de las taxonomías conocidas estén basadas en restos fósiles²⁸, los cuales son rescatados de ejemplares de cherts bien preservados y recristalizados. Los microgránulos de sílice que comprenden el esqueleto radiolario son segregados por el radiolario tras absorber compuestos de silicio de su ambiente acuático, y resultan ser más estables que los de la matriz de los cherts (compuesta por minerales arcillosos). A pesar de que los microgránulos son de mayor tamaño en el chert, el esqueleto radiolario actúa como un solo cristal gracias a su estructura compacta, por lo que se disuelve con mayor lentitud²⁹.

Biomorfos

Los biomorfos son compuestos de silico-carbonatos de metales alcalinotérreos de Ca (II), Ba (II), o Sr (II). Son agrupaciones de millones de nanocristales autoensamblados, que como su nombre lo indica, emulan morfologías de la naturaleza (es decir simetrías, formas y texturas), tanto de la vida primitiva y fósiles, como de organismos actuales, destacando entre ellas las de gusanos, hojas, alfa hélices de proteínas, flores, células en división, entre otras como se muestra en la Figura 3³⁰.

Estas estructuras minerales son actualmente sintetizadas *in vitro* y se obtienen morfologías extraordinariamente similares a las de la era precámbrica, en especial de las rocas con restos fósiles, los cuales presentan una similitud alta con las formas de los cherts y las primeras formas de vida, como son los radiolarios y diatomeas. De esta manera, su peculiar morfología evidencia la posibilidad de que pudieran ser fácilmente sintetizados naturalmente desde la era Precámbrica³⁰. La síntesis de los biomorfos se da en medio alcalino mediante un ciclo auto catalítico de coprecipitación y continua cristalización de nanoestructuras compuestas de carbonatos tales como BaCO₃, SrCO₃ o CaCO₃ cubiertos de sílice que se autoorganizan en superficies bidimensionales para después acomodarse en las intrincadas morfologías que los caracterizan³¹. Son un caso especial de autoorganización química, ya que debido a la unión sílice-carbonato se forman estructuras laminares que poseen bordes redondeados que se rizan conforme crecen y que desafían la cristalografía convencional, comprometiendo la barrera entre la morfología mineral y la biológica³¹. De esta manera, siguiendo el proceso convencional de formación de un cristal, se considera que durante su formación autogeneran impurezas consecutivamente que ocasionan fisuras en el cristal, lo cual explicaría la multitud de nanocristales que se auto ensamblan para conformar las estructuras curvas en su morfología³². Esta es la razón por la cual se estima que se encontraban incluidos en rocas sedimentarias, posiblemente por procesos de biomineralización³³.

Por otra parte, se ha mostrado que la morfología de los biomorfos se afecta por factores como el pH, la temperatura, concentración del metal y de sílice en el medio, corriente eléctrica (positiva o negativa), presión atmosférica y presencia de biomoléculas, en especial de ácidos nucleicos (las cuales dirigen la síntesis de los compuestos inorgánicos hacia una estructura en particular^{9,10,34,35}.

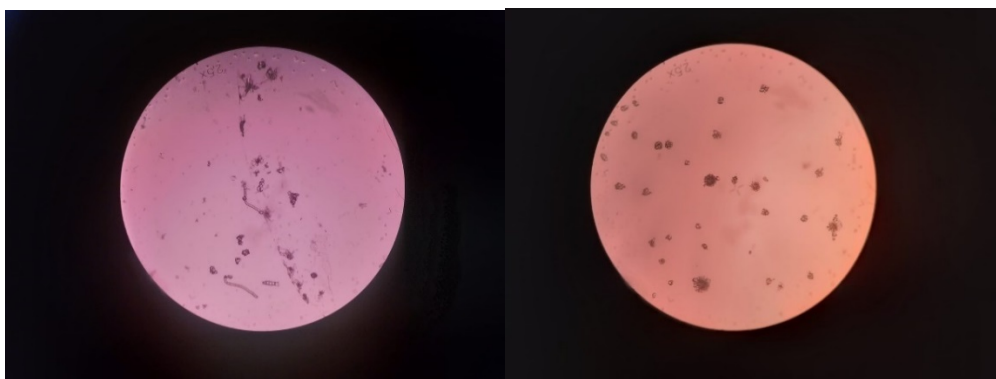


Figura 3. Micrografías de biomorfos de estroncio a) y bario b) bajo microscopio óptico. Magnificación: 10X.

Adicionalmente, se considera factible que el cambio en la atmósfera de la era Precámbrica (atmósfera reductora) con respecto a nuestra época (atmósfera oxidante) haya propiciado el reemplazo del silicio por otros elementos en los enlaces Si-C, a partir de los cuales se ha sugerido que se originó la vida. A pesar de esta sustitución en su estructura, la morfología permaneció constante, la cual pudo ser conservada, dando paso a las diferentes formas de vida. El papel del silicio en los organismos se ha mostrado que ocurrió debido a que es el segundo elemento químico de mayor abundancia en la corteza terrestre, y esto favoreció el que aproximadamente el 60% de los compuestos contenidos en ella lo poseen, cantidad que se estima, fue mucho mayor durante el origen de la vida. Fenómeno apreciable en organismos unicelulares como las diatomeas³⁵.

Interesantemente, los biomorfos aun cuando su composición química es inorgánica, su morfología es prácticamente la reminiscencia a fósiles de vida antigua en restos minerales, que son fácilmente confundibles en morfología y composición química³¹. Debido a su morfología y composición química, se considera que posiblemente al datar la formación de la primera forma de vida, esta haya sido posiblemente confundida con la aparición de un biomorfo, lo que conllevaría a que el verdadero origen de la vida haya sido en una etapa más tardía de lo que se estimaba³⁶.

Con la finalidad de analizar las similitudes y diferencias entre los cherts del Precámbrico con respecto a los biomorfos, se hizo una comparación (Tabla 2). Como se aprecia en el caso de los biomorfos, éstos presentan morfologías similares a las de la era precámbrica especialmente respecto a las rocas que contenían restos fósiles al igual que los cherts, ambos se diferencian en compuestos químicos para formarse, ya que en el caso de los biomorfos requieren de BaCO_3 o CaCO_3 cubiertos de sílice. Rescatando las características de las diatomeas, se encuentran en los océanos, gracias a su baja densidad, algunas especies se encuentran en rocas. Su mayor componente es el silicio, forman parte del fitoplancton y son un bioindicador ambiental. Su gran prosperidad se debe a la abundancia de los silicarbonatos. Son consideradas como un indicio del origen de la vida, debido a que son consideradas bioindicadores, podemos pensar que, gracias a la rica presencia de silicarbonatos en la antigüedad, y como el mayor componente de las diatomeas es el silicio, esto pudo haber tenido un papel crucial en la aparición de las primeras formas de vida. En cuanto a los radiolarios, se encuentran en los océanos, principalmente en la superficie. Su mayor componente es el silicio. Forman parte de los sedimentos biogénicos, proceso activo desde la era cámbrica, por lo cual son útiles para la datación geológica. Los microgránulos de sílice del esqueleto radiolario son segregados después de absorber compuestos de silicio de su ambiente acuático, y resultan ser más estables que los de la matriz de los cherts. Lo que comparten los radiolarios y las diatomeas, es la morfología similar, esfereda, con figuras pennadas en su interior, ambas son acuáticas y conformadas por silicio. Las características que todos mantienen en común es su procedencia marina.

Tabla 2. Similitudes y diferencias entre los cherts del Precámbrico con respecto a los Biomorfos

	Similitudes	Diferencias
Cherts y Biomorfos	<p>Son estructuras minerales</p> <p>Tienen origen en la era Precámbrica</p> <p>Morfologías similares, en especial de radiolarios y diatomeas</p> <p>Reminiscencia de las primeras formas de vida.</p> <p>Su componente principal es el sílice</p> <p>Su formación se ve afectada por factores abióticos como pH, temperatura, concentración, biomoléculas, etc.</p> <p>El cambio de estructura no modificó la morfología</p> <p>Se encuentran en rocas sedimentarias</p> <p>Se forman a partir de la absorción de sílice disuelto</p>	<p>Los cherts son fósiles en restos minerales, mientras los biomorfos son microcristales</p> <p>Requieren de compuestos químicos distintos para formarse.</p> <p>Se presentan en distintos ambientes.</p> <p>El cambio en la atmósfera precámbrica propició la transformación ópalo-cuarzo en cherts y sustitución Si-C en biomorfos.</p> <p>Los biomorfos son de origen inorgánico, los cherts pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos.</p> <p>Los biomorfos forman estructuras laminares sin bordes definidos contrario de los cherts.</p> <p>Los biomorfos son un caso de autoorganización química, los cherts son fósiles.</p> <p>Los biomorfos se sintetizan <i>in vitro</i> y los cherts como resultado de alguna diagénesis.</p> <p>La síntesis de biomorfos se da específicamente en medio alcalino.</p> <p>Los cherts pueden prescindir del sílice disuelto.</p>

Conclusiones

Los cherts, biomorfos, diatomeas y radiolarios comparten características en común, tanto en su formación como en adoptar morfologías de las que posiblemente fueron las primeras formas de vida. Aun cuando presentan similitudes, es importante contar con un mayor número de evidencias que permitan dilucidar si los biomorfos son los cherts, pero que no han sido datados como registro fósil, quedando de esta manera invisibilizados.

Agradecimientos

Mayra Cuéllar-Cruz agradece el apoyo otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del proyecto CF2019-39216, y al proyecto institucional 017/2022 apoyado por la Universidad de Guanajuato. Emilie Pantoja Saldaña y María del Sagrario Caroline Arteaga Domínguez agradecen la beca otorgada por la Universidad de Guanajuato respecto al Programa XXVII Veranos de la Ciencia 2022.

Bibliografía

- (1) García-Fernández, M., Romo-Franco, D., Cuéllar-Cruz, M. (2021). El papel de los silico-carbonatos desde la era precámbrica hasta nuestros días. *Revista Jóvenes en la Ciencia*. 10, 2021, 1-8.
- (2) Schopf, J.W., Kudryavtsev, A.B. (2012). Biogenicity of Earth's earliest fossils: A resolution of the controversy. *Gondwana Res.* 22, 761–771.
- (3) Schopf, J.W., Kudryavtsev, A.B., Agresti, D.G., Wdowiak, T.J., Czaja, A.D. (2002). Laser-Raman imagery of Earth's earliest fossils. *Nature*. 416, 73–76.
- (4) Schopf, J.W. (1993). Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life. *Science*. 260, 640–646.
- (5) Schopf, J.W. (1992). Paleobiology of the Archean. In: Schopf, J.W., Klein, C. (Eds.), *The Proterozoic Biosphere. A Multidisciplinary Study*. 25–39.
- (6) Schopf, J.W.; Packer, B.M. Early Archean (3.3-billion to 3.5-billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia. *Science*, 1987, 237, 70–73.
- (7) García-Ruiz, J.M., Hyde, S.T., Carnerup, A.M., Christy, A.G., Kranendonk, V.M.J., Welham, N.J. (2003). Self-Assembled Silica-Carbons structures and detection of ancient microfossils. *Science*. 302, 1194–1197.
- (8) Cuéllar-Cruz, M., 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 bio-reduction of CO₂ and its implications to the chemical origin of life on primitive Earth. *ACS Omega*. 5, 5460–5469.
- (9) 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. *Cryst. Growth Des.* 19, 4667–4682.
- (10) Cuéllar-Cruz, M., Moreno, A. (2019). The role of calcium and strontium as the most dominant elements during combinations of different alkaline Earth metals in the synthesis of crystalline silica-carbonate biomorphs. *Crystals*. 9, 381.
- (11) 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. *Cryst. Growth Des.* 20, 1186–1195.
- (12) Smith, J.W., Schopf, J.W., Kaplan, I.R. (1970). Extractable organic matter in Precambrian cherts. *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 34, 659–675.
- (13) Piña, A.B. (2015). Cherts, hierro y fosfatos. Geología de rocas carbonáticas, Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. DOI: 10.13140/RG.2.1.4339.3447. 1-17.
- (14) Marin-Carbone, J., Robert, F., Chaussidon, M. (2014). The silicon and oxygen isotope compositions of Precambrian cherts: A record of oceanic paleo-temperatures?. *Precambrian Res.* 247, 223-234.
- (15) Laschet, C. (1984). On the origin of cherts. *Facies*. 10, 257–289.
- (16) Orberger, B., Rouchon, V., Westall, F., de Vries, S.T., Pinti, D.L., Wagner, C., Wirth, R., Hashizume, K. (2006). Microfacies and origin of some Archean cherts (Pilbara, Australia). Processes on the Early Earth, Wolf Uwe Reimold, Roger L. Gibson. DOI: 10.1130/2006.2405(08).
- (17) Muttoni, G., Kent, D.V. (2007). Widespread formation of cherts during the early Eocene climate optimum. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 253, 348-362,
- (18) Perry, E.C., Leticariu, L. (2007). Formation and Geochemistry of Precambrian Cherts, Editor(s): Heinrich D. Holland, Karl K. Turekian, Treatise on Geochemistry, Pergamon. 1-21. ISBN:9780080437514.
- (19) Medlin L, Kooistra W, Gersonde R, Sims P, Wellbrock U. (1997). Is the origin of diatoms related to the end-Permian mass extinction?. *Nova Hedwigia*. 65, 1-11.
- (20) Kingston, J.C. (2003). Araphid and monoraphid diatoms. In: Freshwater Algae of North America. (eds Wehr JD, Sheath RG) pp 595-636. Elsevier Science.

- (21) Lozano-Duque, Y., Vidal, L.A., Navas S., G.R. (2010). Listado de Diatomeas (*Bacillariophyta*) registradas para el Mar Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 39, 83-116.
- (22) Lora-Vilchis, M.C., López-Fuerte, F.O., Pérez-Rojas, C.A. (2020). Algas de Cristal; diatomeas. Recursos Naturales y Sociedad. *Revista Digital de Divulgación Científica.* 6, 25-42.
- (23) Lira Gómez, C.F. (2019). Diatomeas: características, nutrición, reproducción. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/diatomeas/>.
- (24) Seckbach, J. Kocielek. P. (Eds). (2011). Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology. The diatom world. Springer Science & Business Media. Dordrecht. Holanda. 53
- (25) Zapata, J., Olivares, J. (2005). Radiolarios (Protozoa, Actinopoda) sedimentados en el Puerto de Caldera (27°04' S; 70°51' W), Chile. *Gayana*, 69, 78-93.
- (26) Boltovskoy D., Anderson O.R., Correa N.M. (2017). Radiolaria and Phaeodaria. In: Archibald J. et al. (eds) *Handbook of the Protists*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32669-6_19-2.
- (27) Davidson M. (2004). Radiolarians. The Florida State University. Recuperado de <https://micro.magnet.fsu.edu/micro/gallery/radiolarians/radiolarians.html>
- (28) Roger-Anderson O. (1983). Radiolaria. Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg Tokyo. E-ISBN:13:978-1-4612-5536-9. DOI: 10.1007/978-1-4612-5536-9. 1-17.
- (29) Pessagno, E.A., Newport, Jr. R. (1972). A Technique for Extracting Radiolaria from Radiolarian Cherts. *Micropaleontology (JSTOR)*. 18,. 231–34.
- (30) Romo-Franco I.; García-Fernández M.; Cuéllar-Cruz M. (2021). El papel de los biomorfos en el origen químico de la vida. *Revista Jóvenes en la Ciencia.* 10, 1-7.
- (31) Montalti M., Zhang G., Genovese D., Morales J., Kellermeier M., García-Ruiz J.M. (2017). Local pH oscillations witness autocatalytic self-organization of biomorphic nanostructures. *Nat. Commun.* 8, 14427.
- (32) García-Ruiz, J., Melero-García, E., Hyde, S. (2009). Morphogenesis of self-assembled nanocrystalline materials of barium carbonate and silica. *Science.* 323, 362-365.
- (33) Pérez.Hernández, H., Silva-Rodríguez C., Cuéllar-Cruz M. (2021). Implicación del pH en la síntesis de silico-carbonatos de Ca (II), Ba (II) y Sr (II). *Revista Jóvenes en la Ciencia.* 10, 1-6.
- (34) Silva-Rodríguez C.; Pérez-Hernández H.; Cuéllar-Cruz M. (2021). El papel fundamental de la temperatura en el origen químico de la vida: silico-carbonatos como modelo de estudio. *Revista Jóvenes en la Ciencia.* 10, 1-7.
- (35) Aguirre, C., Chávez, T., García, P., Rata, J. (2007). El silicio en los organismos vivos. *Interciencia.* 32, 504-509.
- (36) Cuéllar-Cruz, M., Is,as, S.R., Ramírez-Ramírez, N.; Pedraza-Reyes, M., Moreno, A. (2022). Protection of the DNA from selected species of five kingdoms in Nature by Ba(II), Sr(II), and Ca(II) silica-carbonates: Implications about biogenicity and evolving from the prebiotic chemistry to biological chemistry. *ACS Omega.*