

La evidencia más antigua de vida

CHO-011 · Cosmic History and Its Observers

Una historia científica cronológica desde el universo temprano hasta el presente

Identificador: CHO-011 · Versión: v1.0 · Autor: Juan Seguro

Idioma: Español

Función del artículo: Superposición

Ventana del artículo: [4.400, 3.200] Ga atrás

Corte de eventos: 11 septiembre 2026 · Corte de búsqueda bibliográfica: 13 septiembre 2026

Tipo de documento: Síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares

Resumen estructurado

Contexto. Las rocas terrestres más antiguas han sido alteradas, deformadas y se conservan de forma incompleta. Las afirmaciones sobre vida temprana dependen, por tanto, de señales cuya edad, contexto original y especificidad biológica deben comprobarse por separado.

Pregunta. ¿Qué establece el registro superviviente entre hace 4.4 y 3.2 mil millones de años sobre la presencia de vida y qué trazas propuestas siguen siendo controvertidas?

Evidencia y método. Esta síntesis compara isótopos de carbono y azufre, microestructuras carbonosas, morfologías semejantes a estromatolitos, tejidos de tapetes microbianos, inclusiones fluidas y asociaciones hidrotermales. Cada caso se evalúa mediante cuatro pruebas: edad, singeneticidad, biogenicidad y multiplicidad. La edad de un mineral o roca huésped nunca se trata automáticamente como la edad de una señal.

Resultado. La evidencia propuesta se extiende al Hádico y Eoarcaico, pero las afirmaciones más antiguas presentan poca replicación o interpretaciones geológicas y químicas disputadas. Hacia aproximadamente 3.5–3.4 Ga, la literatura publicada contiene informes candidatos procedentes de múltiples localidades y clases de evidencia. Esa amplitud reduce la dependencia de una única afirmación de prioridad, pero no valida los detalles internos de fuentes que siguen inaccesibles ni establece de forma independiente células, fotosíntesis, reducción de sulfato o metanogénesis.

Conclusión. En conjunto, los registros publicados evaluados y comprobados de forma independiente aquí, procedentes de Isua hacia 3.7 Ga, Dresser hacia 3.48 Ga y Barberton hacia 3.42 Ga, respaldan una inferencia acotada de que algunos entornos eoarcaicos y paleoarcaicos estuvieron habitados, sin identificar un único fósil, metabolismo, hábitat o momento de origen más antiguo. Restringen cuándo existía vida, no cómo se originó. La primera capacidad de observador utilizada por esta serie, detección ambiental y respuesta regulada, se infiere condicionalmente para linajes vivos y no se conserva directamente en rocas antiguas.

Palabras clave: vida más antigua; Arcaico; biofirmas; isótopos de carbono; microfósiles; estromatolitos; metabolismo microbiano; singeneticidad

1. Orientación cronológica

CHO-011 es una superposición que abarca [4.400, 3.200] Ga atrás. Sus límites son una envolvente de búsqueda evidencial, no una afirmación de que la vida comenzara a 4.4 Ga ni de que la evidencia prioritaria termine a 3.2 Ga. El intervalo se solapa con la historia física de la Tierra temprana en CHO-009, los mecanismos del origen de la vida en CHO-010 y el sistema terrestre microbiano en CHO-012.

El problema cronológico central es asimétrico. Como regla operacional para este artículo, una biofirma creíble se trata como evidencia de que la vida existía cuando se formó la señal, no como una medición de cuánto tiempo llevaba existiendo. Rechazar una señal antigua propuesta tampoco demuestra que la Tierra estuviera sin vida en ese momento. Cada aparición aceptada proporciona, por tanto, una restricción de edad mínima para una biosfera establecida, no una marca temporal del origen de la vida.

2. Estado inicial heredado de la Tierra temprana y la química prebiótica

Al inicio de este intervalo evidencial, la Tierra se había diferenciado, conservado o regenerado corteza, interactuado con agua líquida e intercambiado material entre atmósfera, océano, roca y sistemas hidrotermales. CHO-009 proporciona esa historia ambiental. CHO-010 muestra que varias rutas químicas pueden producir precursores, polímeros, compartimentos y dinámicas semejantes a selección bajo condiciones especificadas, mientras ningún experimento reconstruye la transición histórica completa hacia evolución darwiniana abierta.

CHO-011 comienza, por tanto, con dos posibilidades todavía abiertas: la vida puede haber emergido ya o la evolución prebiótica puede haber continuado. La evidencia geológica solo puede estrechar esa incertidumbre cuando una señal es antigua, indígena y más plausiblemente biológica que abiótica.

3. Cuatro pruebas comparativas utilizadas en este artículo

CHO-011 compara cada candidato según cuatro dimensiones de auditoría declaradas: edad, singeneticidad, biogenicidad y multiplicidad. Este es el método operacional del artículo para evitar colapsar evidencias distintas en una única clasificación; no se presenta como una taxonomía universal estándar de cuatro partes.

3.1 Edad

El reloj pertinente puede datar un circón, una unidad ígnea, un horizonte sedimentario, un acontecimiento metamórfico o una veta que corta otras estructuras. Estas edades restringen acontecimientos distintos. Una señal enerrada en un circón de 4.10 Ga no está datada independientemente solo porque el circón sea antiguo. Un chert carbonoso con circones sinvolcánicos puede adquirir una restricción deposicional estrecha, pero el reloj U-Pb medido sigue estando en el circón y no en el carbono. Una estructura hidrotermal hereda una edad de sus relaciones con la roca huésped salvo que la propia estructura contenga una fase datable formada simultáneamente.

3.2 Singeneticidad

La señal debe pertenecer al sistema antiguo. Fluidos posteriores pueden introducir carbono, precipitar grafito o reajustar minerales. El metamorfismo puede redistribuir materia y borrar texturas primarias. Los materiales de preparación y la contaminación moderna crean riesgos adicionales a escalas microscópicas. La posición petrográfica, las relaciones de corte, la inclusión mineral y la química resuelta espacialmente forman, por tanto, parte de la evidencia y no son detalles secundarios.

3.3 Biogenicidad

La forma semejante a vida y la ligereza isotópica no son exclusivas de la vida. El crecimiento mineral, la deformación, las estructuras químicas autoorganizadas, la descarbonatación, las reacciones agua-roca y la producción abiótica de hidrocarburos pueden generar imitaciones parciales. Como criterio operacional de este artículo, un caso se fortalece cuando combina propiedades independientes cuya producción abiótica conjunta es menos plausible que cada propiedad considerada por separado.

3.4 Multiplicidad

Un grano excepcional y un conjunto repetido no tienen el mismo peso evidencial. La replicación entre especímenes, capas, facies, métodos y laboratorios reduce la probabilidad de que una observación refleje contaminación, artefacto analítico o un proceso local no biológico. La multiplicidad no puede reparar un proceso interpretado sistemáticamente de forma errónea, pero cambia la estructura de la inferencia.

4. Candidatos hadeanos y eoarcaicos más tempranos

El candidato registrado más antiguo, clasificado por la edad bien restringida de un mineral que encierra directamente la señal, es grafito en un único circón de Jack Hills datado en 4.10 ± 0.01 Ga, con una composición isotópica de carbono comunicada de $-24 \pm 5\%$ [1]. La observación es llamativa porque sitúa carbono isotópicamente ligero dentro de un mineral hadeano. También tiene una replicación intrínsecamente baja: el estudio comunicó un grano con carbono entre más de diez mil circones examinados. El fraccionamiento abiótico del carbono y la historia geológica de la inclusión siguen siendo relevantes. La conclusión responsable es que se trata de un candidato de carbono potencialmente biogénico, no de evidencia suficiente para declarar una biosfera de 4.1 Ga.

El Nuvvuagittuq Supracrustal Belt de Canadá contiene filamentos de hematita, tubos y rasgos minerales y carbonosos asociados interpretados como posibles restos de organismos de fuentes hidrotermales [2,3]. La unidad propues-

ta como portadora de fósiles se ha situado dentro de un amplio intervalo de roca huésped de aproximadamente 3.75–4.28 Ga. Su extremo de 4.28 Ga no es una edad medida directamente de un mineral que encierre la señal ni de un supuesto fósil y, por tanto, no desplaza la clasificación definida de forma distinta de Jack Hills. Una actualización de 2025 de la edad de la unidad está registrada [4], pero no se utiliza para clasificar los supuestos fósiles en esta versión porque su texto completo sigue sin estar disponible para una clasificación a nivel de afirmación. Algunas estructuras pueden tener análogos biológicos; otras también admiten formación abiótica. La edad de las rocas, la edad de las estructuras y su origen deben permanecer como proposiciones separadas.

Estos casos hadeanos y eocarcaicos tempranos importan incluso cuando no están resueltos. Ponen a prueba hasta dónde puede empujarse el registro antes de que el metamorfismo, el muestreo escaso y las señales no únicas dominen la inferencia.

5. Carbono en Labrador y Groenlandia

El grafito en rocas metasedimentarias del complejo Saglek–Hebron se comunicó como evidencia de organismos de más de 3.95 Ga [5]. Estudios posteriores cuestionaron tanto la edad atribuida a algunas muestras como el supuesto de que todo el carbono grafitico tuviera el mismo origen. Trabajos petrográficos, espectroscópicos y geoquímicos asignaron el grafito de mármol a descarbonatación abiótica, mientras que el grafito depositado por fluidos en formación bandeada de hierro se interpretó como derivado de transformación metamórfica de materia orgánica sin-genética [6]. Una reevaluación geocronológica cuestionó por separado la verdadera antigüedad de la atribución de quimiofósiles [7]. La familia sigue siendo candidata, pero su estatus de prioridad está activamente controvertido.

Mojzsis et al. interpretaron carbono isotópicamente ligero asociado a apatito en rocas de Akilia e Isua como evidencia de vida anterior a 3.8 Ga [8]. Van Zuilen et al. publicaron después una reevaluación atribuyendo partes importantes de la asociación a procesos metasomáticos y abióticos [9]. CHO-011 registra la oposición entre estas interpretaciones publicadas sin tratar ninguno de los relatos causales como establecido únicamente a partir de los resúmenes accesibles. Operacionalmente, una razón isotópica se evalúa junto con su mineral, textura e historia de reacción.

Isua también conserva partículas carbonosas y grafito asociados a horizontes metasedimentarios de aproximadamente 3.7 Ga o más antiguos [10,11,12]. Trabajo reciente con resolución espacial distingue carbono asociado a sedimentos de grafito de veta y examina la alteración a escala de huéspedes minerales concretos [12]. La población asociada a sedimentos presenta una distribución isotópica del carbono más estrecha que la población asociada a vetas, aunque ambas registran modificación metamórfica. Esta separación fortalece el argumento geológico sin hacer biológica toda aparición de grafito. Un estudio de 2026 interpreta además relaciones entre carbono, azufre y hierro en una sucesión de testigo de sondeo como evidencia de diversos metabolismos anaerobios [13]. Esa interpretación pone a prueba alternativas abióticas y metamórficas, pero sigue siendo una reconstrucción causal y no una observación directa de metabolismo.

6. Morfología en Isua

Nutman et al. describieron estructuras cónicas y domales en rocas de Isua de aproximadamente 3.70 Ga como estromatolitos y las presentaron como evidencia de una rápida emergencia de la vida [14]. Allwood et al. publicaron posteriormente una reevaluación tridimensional favorable a una interpretación no biológica relacionada con deformación [15]. CHO-011 conserva por ello este caso como disputa entre afirmaciones publicadas atribuidas; no adjudica la evidencia tridimensional interna que no está disponible.

La disputa ilustra por qué la morfología debe reconstruirse en tres dimensiones e integrarse en la geología regional. Una estructura puede parecerse a un estromatolito más joven en una superficie y fallar al mismo tiempo pruebas de dirección de crecimiento, laminación o contexto ambiental. El resultado apropiado no es votar entre imágenes, sino explicar explícitamente qué observaciones explica cada modelo.

7. Convergencia hacia aproximadamente 3.5–3.4 Ga

El registro se hace más denso en el Paleoearcaico. En Australia Occidental, la Formación Dresser conserva texturas y minerales interpretados como evidencia de comunidades microbianas de fuentes termales terrestres hacia 3.48 Ga [16]. Una corrección de ese estudio identifica una tesis anteriormente omitida como respaldo sedimentológico y estratigráfico detallado para interpretar los depósitos como fluviales y no marinos; no retira la interpretación de

fuelle termal ni de biofirma. El chert Apex contiene objetos filamentosos descritos históricamente como microfósiles [17]. Su contexto geológico y morfología se cuestionaron como artefactos hidrotermales [18], mientras análisis posteriores *in situ* de isótopos de carbono respaldaron diferenciación biológica entre los objetos [19]. Las mediciones posteriores no borran la disputa geológica; añaden otra capa evidencial que debe adjudicarse.

Allwood et al. comunicaron morfologías de estromatolitos a escala de arrecife en el Strelley Pool Chert de aproximadamente 3.43 Ga [20]. Wacey et al. comunicaron después microestructuras carbonosas asociadas a azufre y las interpretaron como evidencia celular y metabólica cerca de 3.4 Ga [21]. Son candidatos publicados independientes y de escalas distintas; CHO-011 no trata la evidencia interna inaccesible como verificada, y su especificidad taxonómica y metabólica sigue abierta.

Sudáfrica aporta una localidad independiente. Tice y Lowe interpretaron material carbonoso en el Buck Reef Chert de 3.416 Ga como tapetes microbianos fotosintéticos depositados en un ambiente marino y no directamente por procesos hidrotermales [22]. Esta frase informa de su interpretación publicada y no afirma que la evidencia interna inaccesible haya sido verificada independientemente. Microestructuras carbonosas en rocas de Barberton de aproximadamente 3.42 Ga también se han interpretado como restos celulares de un entorno hidrotermal subsuperficial [23]. La independencia de localidad y entorno amplía el registro candidato más allá de un único cratón o vía de preservación. No convierte la morfología ni el carbono en evidencia exclusivamente biológica.

En India, Chaudhuri et al. comunican materia carbonosa en chert de Bhitardari del Cratón Singhbhum, una edad $207\text{Pb}/206\text{Pb}$ de $3497 \pm 5 \text{ Ma}$ de circones sinvolcánicos asociados y un valor de carbono global $\delta^{13}\text{C}$ de aproximadamente -30.9‰ [24]. Su título describe «datación directa» de carbono biogénico, mientras el resumen publicado identifica el círculo como analito U–Pb. CHO-011 registra por ello el resultado como una afirmación de edad de roca huésped atribuida y estrechamente vinculada, no como un análisis radiométrico del propio carbono. Los métodos completos no disponibles y la interpretación biogénica siguen sin verificarse aquí.

En conjunto, la literatura contiene registros candidatos de varias regiones y contextos deposicionales hacia aproximadamente 3.5–3.4 Ga. Su diversidad geográfica y evidencial hace que la comparación dependa menos de cualquier afirmación de prioridad aislada, pero no valida de forma independiente una interpretación cuya evidencia interna siga inaccesible. La síntesis resultante es deliberadamente menos específica que declarar un único fósil o hábitat más antiguo.

8. Afirmaciones de prioridad metabólica

Shen et al. interpretaron fraccionamientos isotópicos de azufre asociados a baritas de la Formación Dresser de aproximadamente 3.47 Ga como evidencia de reducción microbiana de sulfato [25]. Ueno et al. publicaron más tarde análisis de cuatro isótopos presentados como nueva evidencia del mismo metabolismo [26]. CHO-011 registra estos resultados como interpretaciones metabólicas atribuidas, no como observaciones directas de reducción de sulfato, y mantiene abiertas las vías volcánicas o abióticas del azufre hasta que puedan verificarse los argumentos internos del sistema isotópico.

Ueno et al. comunicaron metano procedente de inclusiones fluidas en precipitados hidrotermales de Pilbara de aproximadamente 3.5 Ga e interpretaron su composición isotópica como evidencia de metanógenos de más de 3.46 Ga [27]. Horita y Berndt comunicaron formación experimental de metano abiótico y fraccionamiento isotópico bajo condiciones hidrotermales [28]. Estas afirmaciones publicadas establecen una interpretación biológica y una contravía pertinente; por sí solas no verifican la singeneticidad de las inclusiones, excluyen fluidos más jóvenes ni determinan qué vía produjo la señal antigua.

Cavalazzi et al. interpretaron filamentos de Barberton de aproximadamente 3.42 Ga como la evidencia directa más antigua de microorganismos subsuperficiales que ciclan metano y como metanógenos y/o metanótrofos [23]. Dentro de la comparación cronológica registrada aquí, esa afirmación de prioridad específica de fuente es más joven que la afirmación de Ueno et al. de metanogénesis anterior a 3.46 Ga [27] y, por tanto, no la desplaza. Ambas siguen siendo interpretaciones biológicas dependientes de modelo y no observaciones directas de metabolismo.

Fotosíntesis, reducción de sulfato y metanogénesis no son afirmaciones intercambiables. Cada una identifica un metabolismo, proxy y conjunto de alternativas diferentes. Ninguna debe inferirse solo porque existiera vida microbiana en otro lugar al mismo tiempo.

9. Base evidencial, métodos de datación y límites de resolución

Las clases de evidencia resuelven preguntas diferentes:

Clase de evidencia	Fortaleza principal	Limitación principal
Geocronología U–Pb en circón	Edad precisa de cristalización del circón	Data el circón; vincularlo con sedimento o carbono requiere interpretación geológica
Isótopos de carbono	Pone a prueba vías de fraccionamiento del carbono	Los rangos biológicos y abióticos pueden solaparse; la alteración cambia el contexto
Isótopos de azufre	Restringe reservorios de azufre y procesos de fraccionamiento	La atribución metabólica depende de sustratos, vías e intercambio posterior
Morfología	Conserva organización espacial desde escala celular hasta arrecife	Crecimiento mineral, deformación y preparación pueden imitar formas biológicas
Sedimentología y petrografía	Pone a prueba ambiente, orden y singeneticidad	Las rocas antiguas pueden estar incompletas, metamorfizadas o repetidas estructuralmente
Inclusiones fluidas	Pueden conservar fluidos y gases antiguos	Deben establecerse generación, fuga, reapertura y contaminación de la inclusión

La precisión numérica debe seguir al objeto datado. Un resultado de circón de ± 5 Myr no proporciona a cada partícula de carbono de una roca una edad independiente de ± 5 Myr. Un amplio intervalo de unidad huésped no debe colapsarse hasta su extremo más antiguo. Las edades aproximadas utilizadas en este artículo orientan comparaciones; la incertidumbre a nivel de afirmación está acotada por los límites de verificación de fuentes declarados para cada caso.

10. Capacidad del observador en el origen del registro biológico

CHO utiliza OC1 para detección ambiental y respuesta regulada: un sistema vivo detecta una diferencia y cambia de estado mediante una vía reguladora evolucionada. Las rocas antiguas no conservan dinámica de receptores, circuitos de regulación génica ni comportamiento observado. Una biofirma por sí sola no puede demostrar, por tanto, un mecanismo sensorial identificado.

Si un candidato se acepta como evidencia de vida, OC1 se infiere únicamente a nivel de linaje a partir de la organización funcional mínima necesaria para poblaciones vivas y de la biología comparada. Es una reconstrucción condicional, no una observación fósil directa. No implica cognición ni consciencia. La selectividad química prebiótica permanece fuera de OC1 salvo que esté integrada en un sistema vivo evolucionado.

11. Contingencia y contemporáneos

La vida temprana, si estaba presente, habitó un planeta sometido a reciclaje cortical, impactos, circulación hidrotermal, química atmósfera-oceano cambiante y fuerte exposición ultravioleta solar. Pueden haber coexistido múltiples hábitats: zonas fóticas marinas, sedimentos, fracturas bajo el fondo marino, charcas volcánicas y sistemas hidrotermales. La preservación favoreció algunos ambientes y destruyó otros.

El registro superviviente no es, por tanto, un censo. Una localidad famosa puede ser prominente porque sus rocas escaparon de erosión y destrucción metamórfica, no porque la vida comenzara allí. Linajes, metabolismos y hábitats enteros pueden no haber dejado ninguna traza reconocible. A la inversa, una estructura semejante a un producto biológico moderno puede surgir de una vía que ya no sea común en la Tierra.

Nada en el registro exige una única ruta inevitable. Las comunidades tempranas pudieron permanecer restringidas localmente, diversificarse, intercambiar genes o desaparecer sin descendientes. La existencia de vida actual revela supervivencia en algún punto del linaje, pero no el número de orígenes fallidos ni de ramas tempranas extinguidas.

12. Interpretaciones en competencia y cuestiones no resueltas

Siguen abiertas varias preguntas:

1. ¿Las señales de carbono más antiguas son singenéticas y biológicas o productos de reacciones metamórficas y abióticas posteriores?

2. ¿Qué estructuras de Nuvvuagittuq requieren biología una vez modelizados el crecimiento mineral y la deformación?
3. ¿Pueden conectarse las poblaciones de grafito de Isua con organismos o metabolismos concretos sin sobreinterpretar las distribuciones isotópicas?
4. ¿Convergen las señales morfológicas, sedimentológicas y químicas paleoarcaicas dentro de las mismas muestras y acontecimientos deposicionales?
5. ¿Pueden los sistemas isotópicos de azufre y metano excluir cuantitativamente vías hidrotermales abióticas?
6. ¿Cuánto más antiguo que la primera evidencia robusta fue el origen de la vida?

La última pregunta puede seguir infradeterminada. El registro preservado más antiguo está limitado conjuntamente por biología, geología, muestreo y resolución analítica.

13. Clases de afirmaciones, fronteras y exclusiones

Medido u observado: edades minerales, razones isotópicas, texturas, asociaciones minerales, distribuciones espaciales y relaciones de corte comunicadas por los estudios citados.

Reconstruido: ambiente deposicional, singeneticidad, origen biológico, vía metabólica y existencia de una biosfera regional.

Dependiente de modelo: transformaciones por metamorfismo y deformación, vías de reacción abióticas y probabilidad de que varias señales compartan una causa.

Activamente controvertido: grafito hadeano, estructuras y edades de Nuvvuagittuq, antigüedad y origen del grafito de Saglek, carbono de Akilia, morfología de estromatolitos de Isua y microfósiles de Apex.

Especulativo: no se adopta como resultado establecido ningún escenario de origen ni afirmación de consciencia.

Abierto: sobre la evidencia acotada y evaluada en este artículo, el tiempo, lugar y frecuencia exactos del origen de la vida siguen sin resolverse; también la ascendencia directa entre cualquier comunidad candidata y los organismos actuales, y la cognición o consciencia en microbios tempranos. Esta es una conclusión derivada de los límites del registro registrado, no una afirmación de que ninguna evidencia futura pueda resolver esas cuestiones.

CHO-011 es responsable de la adjudicación de prioridad de biofirmas. No reconstruye el mecanismo de origen, que pertenece a CHO-010, ni proporciona la historia completa de ecosistemas arcaicos y fotosíntesis, que pertenece a CHO-012. La evidencia exactamente a 3.200 Ga pasa a CHO-012 bajo la frontera semiabierta.

14. Estado final

Al final del intervalo, la literatura ya no consiste únicamente en informes aislados de carbono antiguo o una única morfología disputada. Múltiples localidades paleoarcaicas han generado informes atribuidos de tapetes microbianos, estructuras a escala de estromatolito, microestructuras carbonosas y señales isotópicas metabólicas. Esta amplitud hace que la reconstrucción dependa menos de una única afirmación de prioridad; no convierte cada candidato en evidencia biológica verificada y cada interpretación sigue condicionada a sus propias pruebas.

CHO-012 hereda una Tierra que, de forma plausible y cada vez mejor documentada, estaba habitada por vida microbiana. Examinará cómo esos organismos participaron en ambientes arcaicos, diversificaron metabolismos y alteraron la química planetaria. La transición desde evidencia de presencia hacia historia de ecosistemas no debe borrar las incertidumbres establecidas aquí.

Referencias

1. Bell, E. A., Boehnke, P., Harrison, T. M., and Mao, W. L. "Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon." *PNAS* 112, 14518–14521 (2015). <https://doi.org/10.1073/pnas.1517557112>
2. Dodd, M. S., et al. "Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates." *Nature* 543, 60–64 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature21377>
3. Papineau, D., et al. "Metabolically diverse primordial microbial communities in Earth's oldest seafloor-hydrothermal jasper." *Science Advances* 8, eabm2296 (2022). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm2296>
4. Sole, C., et al. "Evidence for Hadean mafic intrusions in the Nuvvuagittuq Greenstone Belt, Canada." *Science* 388, 1431–1435 (2025). <https://doi.org/10.1126/science.ads8461>

5. Tashiro, T., et al. “Early trace of life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada.” *Nature* 549, 516–518 (2017). <https://doi.org/10.1038/nature24019>
6. Guo, Z., et al. “Abiotic synthesis of graphitic carbons in the Eoarchean Saglek-Hebron metasedimentary rocks.” *Nature Communications* 15, 5679 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50134-1>
7. Whitehouse, M. J., et al. “On the true antiquity of Eoarchean chemofossils – assessing the claim for Earth’s oldest biogenic graphite in the Saglek Block of Labrador.” *Precambrian Research* 323, 70–81 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.precam-res.2019.01.001>
8. Mojzsis, S. J., et al. “Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago.” *Nature* 384, 55–59 (1996). <https://doi.org/10.1038/384055a0>
9. van Zuilen, M. A., Lepland, A., and Arrhenius, G. “Reassessing the evidence for the earliest traces of life.” *Nature* 418, 627–630 (2002). <https://doi.org/10.1038/nature00934>
10. Rosing, M. T. “¹³C-depleted carbon microparticles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from West Greenland.” *Science* 283, 674–676 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.283.5402.674>
11. Ohtomo, Y., et al. “Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks.” *Nature Geoscience* 7, 25–28 (2014). <https://doi.org/10.1038/ngeo2025>
12. Harding, M. A. R., et al. “Preserved carbon isotope compositions in 3.7 billion year old detrital organic matter from the Isua Supracrustal Belt.” *Communications Earth & Environment* 6, 244 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02215-2>
13. Boyd, A. J., et al. “Evidence for diverse anaerobic metabolisms in 3.7-billion-year-old marine detrital sediments.” *Communications Earth & Environment* 7, 166 (2026). <https://doi.org/10.1038/s43247-026-03188-6>
14. Nutman, A. P., et al. “Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures.” *Nature* 537, 535–538 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature19355>
15. Allwood, A. C., et al. “Reassessing evidence of life in 3,700-million-year-old rocks of Greenland.” *Nature* 563, 241–244 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0610-4>
16. Djokic, T., et al. “Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 Ga hot spring deposits.” *Nature Communications* 8, 15263 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms15263>
17. Schopf, J. W. “Microfossils of the Early Archean Apex chert.” *Science* 260, 640–646 (1993). <https://doi.org/10.1126/science.260.5108.640>
18. Brasier, M. D., et al. “Questioning the evidence for Earth’s oldest fossils.” *Nature* 416, 76–81 (2002). <https://doi.org/10.1038/416076a>
19. Schopf, J. W., et al. “SIMS analyses of the oldest known assemblage of microfossils document their taxon-correlated carbon isotope compositions.” *PNAS* 115, 53–58 (2018). <https://doi.org/10.1073/pnas.1718063115>
20. Allwood, A. C., et al. “Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia.” *Nature* 441, 714–718 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature04764>
21. Wacey, D., et al. “Microfossils of sulphur-metabolizing cells in 3.4-billion-year-old rocks of Western Australia.” *Nature Geoscience* 4, 698–702 (2011). <https://doi.org/10.1038/ngeo1238>
22. Tice, M. M., and Lowe, D. R. “Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean.” *Nature* 431, 549–552 (2004). <https://doi.org/10.1038/nature02888>
23. Cavalazzi, B., et al. “Cellular remains in a ~3.42-billion-year-old seafloor hydrothermal environment.” *Science Advances* 7, eabf3963 (2021). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf3963>
24. Chaudhuri, T., et al. “Direct dating of 3.5 Ga biogenic carbon in a microbial mat remnant, Singhbhum Craton, India.” *PNAS* 123, e2617912123 (2026). <https://doi.org/10.1073/pnas.2617912123>
25. Shen, Y., Buick, R., and Canfield, D. E. “Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archaean era.” *Nature* 410, 77–81 (2001). <https://doi.org/10.1038/35065071>
26. Ueno, Y., Ono, S., Rumble, D., and Maruyama, S. “Quadruple sulfur isotope analysis of ca. 3.5 Ga Dresser Formation: New evidence for microbial sulfate reduction in the early Archean.” *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 5675–5691 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.08.026>
27. Ueno, Y., et al. “Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archaean era.” *Nature* 440, 516–519 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature04584>
28. Horita, J., and Berndt, M. E. “Abiogenic methane formation and isotopic fractionation under hydrothermal conditions.” *Science* 285, 1055–1057 (1999). <https://doi.org/10.1126/science.285.5430.1055>

Declaración

Este documento es una síntesis académica; no es investigación primaria y no ha sido revisado por pares. Juan Segurola es el único autor. Aprobó el texto final y es responsable de su contenido.