

BUSCANDO EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA COSMOQUÍMICA

LOS ASTEROIDES Y SUS METEORITOS RICOS EN CARBONO

SANDRA PIZZARELLO

Las condritas carbonáceas son meteoritos que contienen carbono. Proviene de asteroides primitivos y son las únicas que, a día de hoy, han aportado muestras de evolución química para los análisis en laboratorio. Los estudios han revelado que existía una abundante química orgánica en el sistema solar antes del comienzo de la vida terrestre. Con la llegada de meteoritos y cometas, estos procesos podrían haber impulsado el origen de la bioquímica de nuestro planeta.

Palabras clave: elementos biogénicos, meteoritos carbonáceos, evolución química, quiralidad, quimio-biogénesis.

Louis Lerman (2010) escribió recientemente:

Los problemas que plantea el origen son la cuestión científica más conjetural y cualitativa. No es sorprendente, por lo tanto, que el origen de la vida, como el origen del universo, carezca de supuestos y condiciones iniciales definidos de forma unívoca. Individualmente, son preguntas de Fermi de tipo funcional, que requieren un enfoque conceptual rudimentario para una situación de ignorancia cuantitativa fundamental.

Bien explicado, si bien bastante complejo, puesto que los procesos que llevan al origen de la vida siguen siendo completamente desconocidos y difíciles de descifrar.

No obstante, los estudios sobre los orígenes han avanzado como si nada, y esta ignorancia tan intimidatoria se ha visto moderada en cierto modo porque comparte materia con una amplia variedad de campos de investigación, como la astrofísica, la cosmoquímica y la biología evolutiva, por mencionar unos pocos. Esta amplia perspectiva ha investigado más allá del origen de la vida y ha extendido el conocimiento actual sobre la evolución biológica, según el cual todos los organismos derivan de un ancestro mínimo común y estuvo precedida por una evolución química. Debido a este proceso, los elementos biogénicos H, C, N,

O, P y S, originados en el Big Bang y en la posterior generación de estrellas, evolucionaron durante la larga historia cósmica y formaron moléculas abióticas cada vez más complejas, algunas de las cuales acabaron alcanzando sistemas planetarios como el nuestro, por lo que podrían haber llevado a la creación de las moléculas precursoras de la vida.

■ EL CONCEPTO DE QUIMIOBIOGÉNESIS

Gracias al análisis de un grupo de meteoritos con abundante contenido carbónico, las condritas carbonáceas, se ha podido someter a escrutinio experimental la posibilidad de que una evolución química prebiótica natural llegara a la Tierra primigenia, idea a la que Von Kiedrowski (2005) se refirió ingeniosamente como quimiobiogénesis (“chembiogenesis”). En base a estos hallazgos y al mencionado conjunto de estudios, ya en 1985, la NASA (Wood y Chang, 1985) publicó una llamativa viñeta resumen que se muestra en la figura 1, que nos transporta a lo largo de un camino de evolución cósmica de casi diez mil millones de años (y en el que, ciertamente, incluir la cadena de ADN tal vez sea un poco exagerado).

«GRACIAS AL ANÁLISIS DE UN GRUPO DE METEORITOS CON ABUNDANTE CONTENIDO CARBÓNICO SE HA PODIDO SOMETER A ESCRUTINIO EXPERIMENTAL LA POSIBILIDAD DE QUE UNA EVOLUCIÓN QUÍMICA PREBIÓTICA NATURAL LLEGARA A LA TIERRA PRIMIGENIA»

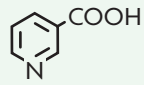
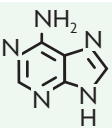
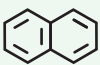
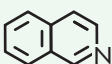
Clase de compuesto	Estructura	Molécula de ejemplo	Nº de compuestos
Ácidos carboxílicos	$\text{H}_3\text{C}-\text{COOH}$	ácido acético	48
Aminoácidos	$\begin{array}{c} \text{NH}_2 \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{COOH} \\ \\ \text{H} \end{array}$	alanina	74
Hidroxiácidos	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{COOH} \\ \\ \text{H} \end{array}$	ácido láctico	20
Cetoácidos	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{COOH} \end{array}$	ácido pirúvico	12
Ácidos dicarboxílicos	$\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_2-\text{COOH}$	ácido succínico	17
Azúcares alcohólicos y ácidos	$\begin{array}{c} \text{OH} \quad \text{OH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C}-\text{C}-\text{CHO} \\ \\ \text{H} \end{array}$	gliceraldehído	19
Aldehídos y cetonas	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{H} \end{array}$	acetaldehído	18
Aminas y amidas	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2\text{NH}_2$	etilamina	13
Ácidos carboxílicos de base pirimidínica		ácido nicotínico	7
Purinas		adenina	5
Hidrocarburos:			
Alifáticos	$\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	propano	140
Aromáticos		naftalenos	87
Polares		isoquinolinas	14

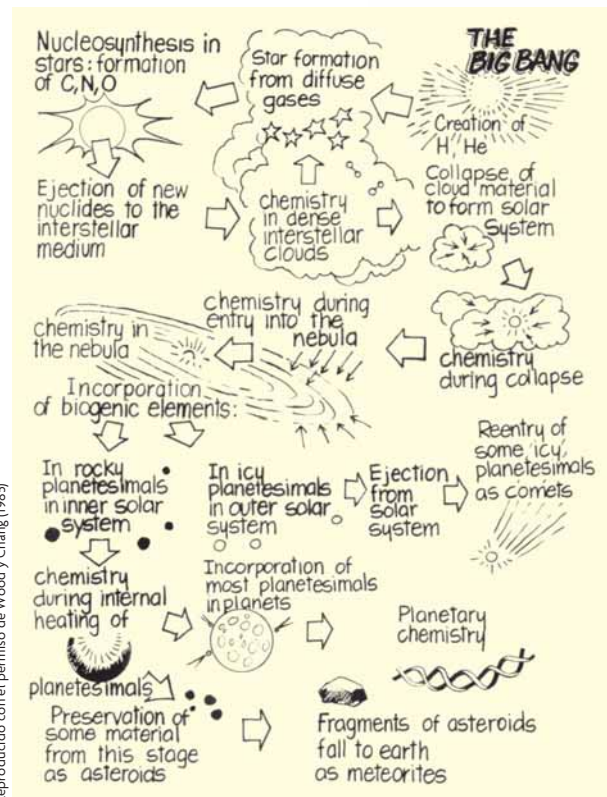
Tabla 1. Resumen de los tipos de moléculas más importantes que se encuentran en las condritas carbonáceas.

Algunos antecedentes pueden resultarnos útiles: un meteorito es cualquier cuerpo sólido y pequeño que llegue a la Tierra desde el espacio exterior. Por ejemplo, se han recogido muestras de meteoritos originados en la Luna, Marte o incluso Mercurio. El aporte más importante, sin embargo, es del cinturón de asteroides. Los asteroides son pequeños cuerpos rocosos que, al caer en una órbita de acreción durante las primeras etapas de la formación del Sistema Solar, se vieron afectados por el tirón gravitatorio de los planetas gigantes que ya se habían formado pero no lograron formar su propio planeta, por lo que miles de ellos quedaron orbitando el Sol como grupos de rocas entre Marte y Júpiter. Todos los meteoritos llegan a la Tierra tras un impacto que desestabiliza su localización original, pero el cinturón de asteroides está tan abarrotado que las colisiones también son muy frecuentes y han puesto fragmentos de asteroides en la órbita terrestre desde la acreción del planeta.

Las condritas carbonáceas tienen una composición primitiva y muestran distribuciones elementales similares a las solares, desprovistas, hasta cierto punto, de los elementos más volátiles, H, C, O y N. Estos meteoritos son poco comunes, comprenden solo el 4,7 % del total de los que han caído desde 1806. Se han encontrado muchos más (se les llama, de hecho, «encontrados») pero, con la excepción de algunos que se encontraron en la Antártida, se suelen contaminar muy rápidamente por la química de la biosfera y, dado que, especialmente, las bacterias los prefieren como alimento, se descomponen en entornos terrestres. Las condritas carbonáceas se clasifican en diferentes subgrupos dependiendo, entre otras cosas, de la cantidad de agua que contienen, las fases hídricas de sus minerales y las diferencias de inclusión (Zolensky et al., 1997).

Todas las condritas carbonáceas contienen carbono orgánico, que varía en complejidad desde los materiales orgánicos macromoleculares insolubles similares a los querógenos hasta compuestos solubles simples, algunos de los cuales son idénticos a las biomoléculas. Por lo tanto, los estudios de estos meteoritos han proporcionado no solo pruebas de que se pueden formar compuestos idénticos a las moléculas de la vida de forma abiótica, sino también información sobre el inventario orgánico que probablemente fue incorporando la Tierra en los primeros momentos. La tabla 1 muestra un resumen de los tipos de moléculas más importantes que se encuentran en las condritas carbonáceas y su distribución, pero se sabe que muchos otros están presentes, aunque solo sea por su composición elemental (Schmitt-Kopplin et al., 2010).

Los compuestos listados en la tabla 1 (Pizzarello, Cooper y Flynn, 2006; Pizzarello, Williams, Lehman, Holland y Yarger, 2011) se suelen encontrar al extraer el polvo del meteorito mediante agua y disolventes. Sin



Reproducido con el permiso de Wood y Chang (1985)

Figura 1. En 1985 la NASA publicó esta curiosa viñeta infográfica que nos transporta a lo largo de un camino de evolución cósmica de casi diez mil millones de años (y en el que, ciertamente, incluir la cadena de ADN tal vez sea un poco exagerado).

embargo, los compuestos libres también se pueden extraer de materiales orgánicos insolubles bajo condiciones hidrotérmicas (300 °C y 100 megapascales) no muy diferentes de las que se encuentran en las fumarolas del fondo del océano (Yabuta, Williams, Cody, Alexander y Pizzarello, 2007). Este tratamiento puede producir hidrocarburos, así como moléculas que contienen oxígeno como los ácidos dicarboxílicos y, sorprendentemente, grandes cantidades de amoníaco (Pizzarello y Groy, 2011).

A pesar de que los profundos estudios moleculares e isotópicos durante más de cuarenta años han contribuido en gran medida a incrementar nuestro conocimiento de la distribución, propiedades y posibles condiciones para la formación de compuestos meteoríticos orgánicos, todavía no comprendemos completamente las vías sintéticas ni los entornos originales básicos (es decir, presolares, frente a solares) de algunos de ellos.

Todavía más esquiva es la valoración de una posible exobiología, esto es, cómo la aportación exógena de material meteorítico podría haber llevado al origen de la vida. Como sugieren la figura 1 y la tabla 1, la formación de moléculas compuestas de C, H, O y N parece ser un proceso evolutivo universal que provoca una

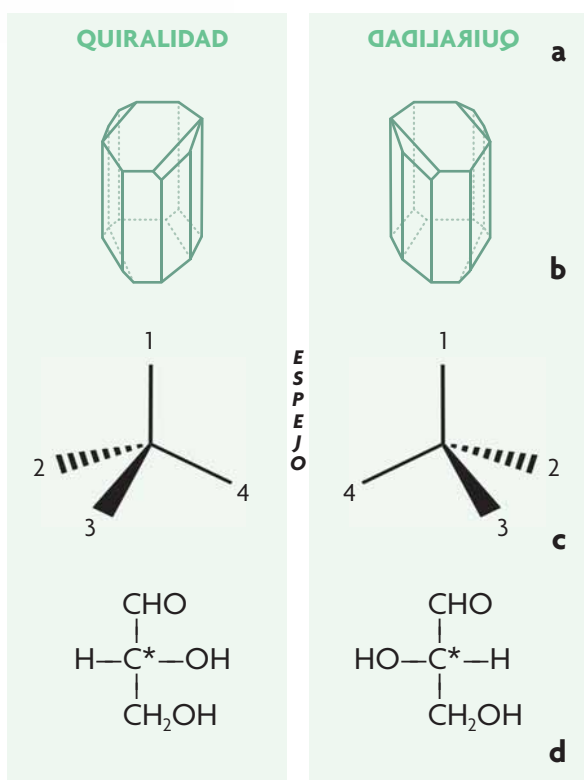


Figura 2. La quiralidad es una propiedad general de los objetos que pueden existir en dos formas que son imágenes especulares la una de la otra pero no se pueden superponer. Podría ser la propiedad de ensamblajes de varios componentes (a), de cristales (b) y de cualquier molécula orgánica compuesta de un carbono y cuatro sustituyentes diferentes, conocidas como carbonos asimétricos (c-d).

gran complejidad química pero se produce por vías fundamentalmente diferentes antes y después del inicio de la vida. La evolución prebiótica, de hecho, muestra características de una química regida únicamente por fuerzas fisicoquímicas, mientras que el resto de la vida terrestre, sea simple o compleja, demuestra una selectividad estrictamente química en la estructura y función tanto de sus componentes poliméricos como de los monoméricos. Se pueden encontrar ejemplos comparativos en bioquímica. Por ejemplo, los aminoácidos meteoríticos presentan una diversidad estructural casi completa para un cierto número de carbonos, son menos abundantes conforme crecen sus cadenas de carbono y podemos encontrar cerca de cien diferentes, mientras que las proteínas terrestres solo tienen 22 componentes (Pizzarello et al., 2006).

«LOS ESTUDIOS DE METEORITOS HAN PROPORCIONADO INFORMACIÓN SOBRE EL INVENTARIO ORGÁNICO QUE PROBABLEMENTE FUE INCORPORANDO LA TIERRA EN LOS PRIMEROS MOMENTOS»

■ ¿BIOQUÍMICA A PARTIR DE LOS METEORITOS?

Otro aspecto de la quimiobiogénesis es el estudio de la posibilidad de que alguna de las características químicas de la bioquímica terrestre pudiera derivar de la cosmoquímica. En esta búsqueda de una posible relación entre la materia orgánica y la bioquímica de los meteoritos destaca la asimetría molecular. La quiralidad, del griego *χειρ*, que significa ‘mano’, es una propiedad general de los objetos que, como las manos, pueden existir en dos formas que son imágenes especulares la una de la otra pero no se pueden superponer. También es una propiedad de cualquier molécula orgánica con un carbono y cuatro sustituyentes diferentes, lo que se conoce como carbono asimétrico (C* en la figura 2). Nos referimos con el nombre de *enantiómeros* a ambas formas especulares de un compuesto quiral. En el caso de compuestos bioquímicos como los aminoácidos y los hidroxiaácidos, les llamamos enantiómeros D- y L- (del latín *dexter* y *laevus*).

La quiralidad es ante todo una propiedad interactiva, puesto que se puede visualizar fácilmente pensando en dos personas estrechando sus manos derechas en lugar de una izquierda y una derecha. Por esta razón, es fundamental para el progreso de las funciones y estructuras de la vida existente; por ejemplo, todos los aminoácidos de las proteínas terrestres son de configuración L, mientras que el azúcar de los polímeros de información, el ADN y el ARN, siempre es un enantiómero D. La quiralidad, por lo tanto, es un rasgo molecular indispensable de algunas biomoléculas esenciales.

Debido a las distribuciones estocásticas determinadas para todos los meteoritos orgánicos, resultó inesperado y emocionante descubrir que algunos aminoácidos meteoríticos presentaban un exceso enantiomérico L. Anteriormente, la investigación estuvo rodeada de polémica debido a la «homoquiralidad» de las proteínas terrestres y a la posibilidad de que las muestras contuvieran contaminación terrestre, pero finalmente se detectaron en algunos compuestos que son abundantes en meteoritos pero no muy comunes en la bioquímica terrestre, los α -metil- α -aminoácidos, y se observaron excesos enantioméricos (*ee*) que, si bien no eran tan extensos, sí que tenían la misma configuración (L) que los aminoácidos terrestres (Pizzarello y Groy, 2011). Hasta la fecha, diez de estos compuestos y un hidroxiaácido presentan *ee*, y



MÉTODO

Figura 3. Un fragmento del meteorito de Murchison en el Museo Nacional de Historia Natural de Washington (EEUU). Los descubrimientos que ha proporcionado este meteorito permitieron a los científicos sugerir que los componentes meteoríticos podrían haber contribuido con su capacidad de autoensamblaje a la química de una Tierra temprana.

los descubrimientos han hecho resurgir las especulaciones acerca de si los procesos prebióticos extraterrestres podrían haber aportado a la Tierra primigenia un inventario «primordial» de moléculas orgánicas esenciales con una ventaja en la evolución molecular debido a su asimetría quiral, es decir, especulaciones sobre una posible exobiología.

Entre los posibles efectos de un aporte exógeno de material carbonáceo, la extracción de moléculas formadoras de vesículas del meteorito de Murchison también podría tener especial relevancia (figura 3). Deamer demostró en 1985 que las vesículas están formadas por componentes orgánicos del meteorito de Murchison, como la mezcla entre componentes anfífilos y ácidos carboxílicos con cadenas más largas, entre otros, y que colaboran eficientemente con la formación de membranas y vesículas con un incremento sostenido de la tensión superficial de las soluciones acuosas (Deamer, 1985). Los resultados plantean la perspectiva interesante de que los componentes meteoríticos podrían haber contribuido con su capacidad de autoensamblaje a la química de una Tierra temprana.

Para concluir este breve repaso de la química de los meteoritos carbonáceos nos podríamos preguntar si el título es razonable y podemos, en efecto, pensar que la cosmoquímica contribuyó al origen de la vida. Pese a que nos vemos restringidos por todo lo que ignoramos sobre su origen, los datos disponibles hasta ahora nos permiten al menos establecer un escenario plausible en el que materiales exógenos como los de los meteoritos y, probablemente, los cometas llegaron en gran número a la Tierra temprana y contribuyeron a la reserva orgánica del planeta, proporcionando un medio incipiente

de selección mediante algunos de sus compuestos quirales y sus catalizadores y contribuyendo a la evolución molecular prebiótica.

Debido a la inmensa cantidad de información de la que carecemos en nuestra investigación, el anuncio del 6 de enero de 2015 de que la misión Kepler había confirmado el milésimo exoplaneta candidato y que seis de los nuevos exoplanetas confirmados son de un tamaño similar al de la Tierra y están en las zonas habitables de sus respectivas estrellas ha sido, en cierta medida, tranquilizador... Tal vez Galileo no pensaba en la exobiología cuando sentenció *astrae regunt*, pero pese a ello, mirar a las estrellas todavía puede ofrecernos información básica. ☺

REFERENCIAS

- Deamer, D. (1985). Boundary structures are formed by organic components of the Murchison carbonaceous chondrite. *Nature*, 317, 792–794. doi: 10.1038/317792a0
- Lerman, L. (2010). The primordial bubble: Water, symmetry breaking, and the origin of life. En R. M. Lyndell-Bell, S. C. Morris, D. Barrow, J. L. Finney, & C. Harper. (Eds.), *Water and life: The unique properties of H₂O* (pp. 259–290). Boca Raton: CRC Press.
- Pizzarello, S., Cooper, G. W., & Flynn, G. J. (2006). The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles. En D. Lauretta, & H. Y. McSween Jr (Eds.), *Meteorites and the Early Solar System II* (pp. 625–651). Tucson: University of Arizona Press.
- Pizzarello, S., Williams, L. B., Lehman, J., Holland, G. P., & Yarger, J. L. (2011). Abundant ammonia in primitive asteroids and the case for a possible exobiology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 108, 4303–4306. doi: 10.1073/pnas.1014961108
- Pizzarello, S., & Groy, T. L. (2011). Molecular asymmetry in extraterrestrial organic chemistry: An analytical perspective. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 645–656. doi: 10.1016/j.gca.2010.10.025
- Schmitt-Kopplin, P., Gabelica, Z., Gougeon, R. D., Fekete, A., Kanawati, B., Harir, M., ... Hertkorn, N. (2010). High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 107, 2763–2768. doi: 10.1073/pnas.0912157107
- Von Kiedrowski, G. (Org.). (2005, September 28–October 1). *Chemiogenesis: Prebiotic chemistry and early evolution*. ECLT, Venice International University. Consultado en http://www.istpace.org/Web_Final_Report/scientific_meetings_at_eclt/workshops/second_year_april_2005_marc/prebiotic_chemistry_and_ear.html
- Wood, J. A., & Chang, S. (Eds.). (1985). *The Cosmic History of the Biogenic Elements and Compounds*. Washington, DC: Scientific and Technical Information Branch, National Aeronautics and Space Administration Publisher.
- Yabuta, H., Williams, L. B., Cody, G. D., Alexander, C. M. O'D., & Pizzarello, S. (2007). The insoluble carbonaceous material of CM chondrites: A possible source of discrete organic compounds under hydrothermal conditions. *Meteoritics & Planetary Science*, 42, 37–48. doi: 10.1111/j.1945-5100.2007.tb00216.x
- Zolensky, M. E., Mittlefehldt, D. W., Lipschutz, M. E., Wang, M. S., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., ... Barber, D. (1997). CM chondrites exhibit the complete petrologic range from type 2 to 1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 5099–5115. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00357-8

Sandra Pizzarello. Profesora e investigadora del departamento de Química y Bioquímica de la Universidad Estatal de Arizona. Durante más de treinta años se ha centrado en el estudio de la materia orgánica en meteoritos del tipo condrita carbonácea, especialmente en las características moleculares, isotópicas y quirales de sus compuestos solubles. Recientemente se ha ocupado del estudio de los aminoácidos no racémicos provenientes de meteoritos. Ha publicado en revistas como *Science* y *PNAS*, entre otras.