

EL ORIGEN GEOLÓGICO DE LA VIDA: UNA PERSPECTIVA DESDE LA METEORÍTICA

Fernando Ortega-Gutiérrez¹

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Deleg. Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F.
E-mail: fortega@unam.mx

RESUMEN

El origen de la vida tiene sus raíces en las etapas primitivas de la evolución planetaria, registradas por los cuerpos extra-terrestres hoy llamados meteoritas y representa la materia prima principal formadora de los planetas rocosos como Mercurio, Venus, Tierra y Marte. Este registro incluye el material químico precursor de la vida, así como aquellos eventos altamente energéticos cuya naturaleza pudo acelerar el proceso de evolución química de ese material hasta la vida, o bien retrasar su formación.

Por otra parte, la geología es la ciencia que estudia los objetos y procesos naturales que han marcado la evolución planetaria del Sistema Solar interior y en consecuencia se liga estrechamente con la ciencia de la Meteorítica. Este trabajo analiza esta relación considerando primero las características químicas y mineralógicas de las poblaciones actuales de meteoritas, ya que representan restos de los objetos (planetesimales) cuya coalescencia formó a los planetas en las primeras etapas de la historia del Sistema Solar, y luego analiza las consecuencias negativas o positivas de ese proceso de crecimiento planetario para la generación de la vida en la Tierra.

Como conclusión final del trabajo, se puede decir que Geología y Meteorítica estudian procesos naturales intrínsecamente ligados con la historia temprana de la Tierra, los cuales lograron generar la vida sólo 1,000 millones de años (Ma) después de formado el planeta.

Palabras Clave: Geología, Meteorítica, Sistema Solar, Tierra, vida.

ABSTRACT

The origin of life is rooted in the most primitive events of planetary evolution, events which were faithfully registered by the extraterrestrial bodies today called meteorites, and which formed the main constituent of rocky planets, such as Mercury, Venus, Earth and Mars. This register includes the chemical compounds precursors of life, as well as those high-energy events, whose nature could have accelerated the process of chemical evolution leading to life or delaying it.

On the other hand, Geology is the science that studies those objects and processes which have marked the planetary evolution of the interior of the Solar System, and consequently it is closely interrelated with the science of Meteoritics. This work analyses this intrinsic relationship by firstly considering the chemical and mineralogical properties of the actual meteorite populations because they represent the remaining of the objects (planetesimals), the coalescence of which formed the planets at the beginnings of the Solar Systems, and then deals with the negative or positive consequences of that accretionary process for the generation of life on Earth. As the main conclusion of this work thus, it may be stated that Geology and Meteoritics comprise the study natural processes intimately related with the early history of the Earth leading to the appearance of life only 1,000 million years (Ma) after the formation of the planet.

Key Words: Geology, Meteoritics, Solar System, Earth, Life.

INTRODUCCIÓN

La vida para generarse y luego desarrollarse necesita de nutrientes, energía, agua en estado líquido y un tiempo relativamente prolongado para que la materia evolucione químicamente. ¿Dónde y desde cuándo existieron estas condiciones en nuestro entorno del Sistema Solar para originar la vida como la conocemos? Las rocas terrestres y particularmente las meteoritas proveen de información clave para contestar en parte estas grandes interrogantes surgidas desde que la especie humana tomó conciencia de su propia existencia. Las rocas más antiguas identificadas en la Tierra en la provincia de Labrador en Canadá tienen alrededor de 4,280 millones de años (Ma) (O'Neil *et al.*, 2008)¹, aunque existen minerales (zircones) separados de rocas sedimentarias en Australia con edades hasta poco más de 4,400 Ma (Wilde *et al.*, 2001)². La vida evidente (microfósiles) existe desde hace aproximadamente 3,500 Ma (Schopf, 1993)³, pero indicadores isotópicos y petrológicos sugieren su existencia (Isla de Akilia en Groenlandia) desde hace más de 3,850 Ma (Mojzsis *et al.*, 1996)⁴.

Por otra parte, las meteoritas son rocas formadas fuera de la Tierra en el Cinturón de Asteroides del Sistema Solar interior, las cuales periódicamente caen sobre su superficie suministrando material geológico para el estudio de los procesos naturales que les dieron origen y luego las separaron violentamente de sus cuerpos parentales cambiando su estructura y composición hasta su llegada a la superficie de la Tierra. Las meteoritas en general registraron los procesos físicos, químicos y geológicos más primitivos de formación planetaria en el Sistema Solar. La composición dominante de los tres grandes grupos de meteoritas en que se han dividido son: a) las metálicas (Fe y Ni) con algunos sulfuros (meteoritas de hierro), b) con silicatos, metales y óxidos (condritas ordinarias y acondritas) y c) mixtas, compuestas por metal Fe-Ni y olivino (silicato de magnesio). Entre las condritas se tiene un grupo muy escaso donde abundan los materiales orgánicos primordiales para la vida compuestos por elementos volátiles como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre. Este trabajo describe brevemente aspectos básicos sobre la naturaleza de estas meteoritas, por haber conservado la historia más temprana de los grandes eventos que generaron o destruyeron las condiciones primarias para que la vida surgiera en la Tierra.

DEFINICIÓN DE VIDA

Definir la vida ha sido una tarea inconclusa y no exenta de ambigüedad, pues sus elementos y procesos son complejos y no del todo conocidos (Benner, 2010)⁵; (Bedau, 2010)⁶; sin embargo, una definición satisfactoria aunque elaborada podría ser la siguiente:

La vida como la conocemos es un fenómeno natural que caracteriza a cualquier objeto material cuya composición química esté basada en el carbón, asociado con los gases

reactivos más abundantes del universo (H, O, N), y que esté integrada por moléculas organizadas en estructuras con las siguientes características: a) están confinadas por una membrana, b) pueden autoreplicarse, c) guardan, copian, transcriben y transmiten información, d) pueden sostener de manera continua procesos de transformación química (metabolismo) que toman energía del medio ambiente y e) pueden evolucionar en el sentido darwiniano. La teoría de evolución de la vida “más aceptada” propone un mundo ARN (ácido ribonucleico) anterior al mundo ADN (ácido desoxiribonucleico) actual (p. ej. Orgel, 2004)⁷. El ARN en el mundo primitivo habría funcionado como una molécula autoreplicante hasta que eventualmente se desarrollaron estructuras con funciones catalíticas mínimas confinadas por una membrana de lípidos semi-impermeable (protocélula), donde luego se sintetizó el ADN, molécula precursora e indispensable para el funcionamiento de todos los seres vivos en el mundo celular que conocemos.

La evolución de la vida desde su aparición en la Tierra presenta una prolongada trayectoria de diversificación ramificada con el tiempo en tres dominios a partir de un ancestro común (Figura 1), cuya estructura y origen son fuertemente debatidos, pero que no será materia de discusión en el trabajo presente.

PREMISAS USADAS EN EL TRABAJO

Afortunadamente existen hechos de índoles diversas y probadas que permiten un análisis sólido sobre las posibles condiciones, mecanismos y tiempos que lograron la formación de la vida en la Tierra, los cuales integran la base en que se sustenta este trabajo:

- La estructura de la materia viva está compuesta esencialmente por seis elementos químicos: carbón, hidrógeno, oxígeno,

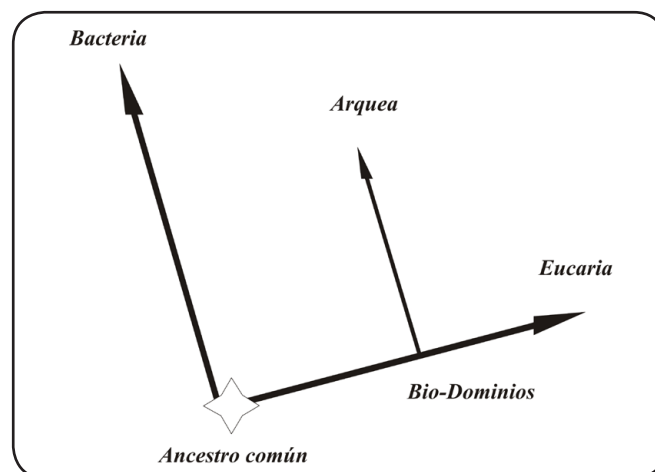


Figura 1. Diagrama que muestra los grandes eventos de la evolución de la vida a partir de un ancestro común (primera célula) en los tres bio-dominios actuales de los seres vivos.

nitrógeno, fósforo y azufre (CHONPS por sus símbolos químicos).

- b) Las meteoritas de cierta clase (condritas carbonosas) contienen esos elementos en gran abundancia, incluyendo algunas de las clases CI1 (tipo 1 de la meteorita de referencia Ivuna) y CM2 (tipo 2 de la meteorita de referencia Mighei) que contienen compuestos orgánicos “complejos” de importancia prebiológica.
- c) Los planetas llamados terrestres o silicatados (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) deben su estructura a la acreción de millones de planetesimales de composición esencialmente condritica, como los que pueblan actualmente el cinturón de asteroides ubicado entre las órbitas de Marte y Júpiter.
- d) Dos eventos catastróficos relacionados con la Meteorítica intervinieron e influenciaron fuertemente la evolución química de las capas más superficiales de la Tierra (litósfera, hidrósfera y atmósfera); uno definitivamente opuesto a la formación de la materia viva (la formación de la Luna) y otro (el Gran Bombardeo Tardío, GBT), cuyo carácter destructivo o constructivo de la vida está en debate, así como su existencia misma.
- e) La vida fue evidente en la Tierra luego de transcurridos 1,100 Ma desde la condensación, a partir de un núcleo de una nube molecular precursora, de los objetos más antiguos identificados en las meteoritas conocidos como inclusiones ricas en calcio y aluminio (ICAs por sus siglas).

METEORITAS

Las meteoritas son rocas extraterrestres que conservan en su estructura la información necesaria para entender la evolución

del Sistema Solar desde su origen o más allá, hasta el origen mismo y evolución de las estrellas. Esta información está guardada en su composición química y mineral, así como en sus texturas y estructuras. Por la escasez de esos materiales en la Tierra, cada hallazgo o caída que se observe se convierte en un acontecimiento importante para la ciencia. Algunas meteoritas como Orgueil (Francia, 1864), Ivuna (Tanzania, 1938), Murray (Estados Unidos, 1950) y Murchison (Australia, 1969), incluso contienen compuestos orgánicos complejos (aminoácidos, azúcares, etc.) precursores de moléculas que tal vez dieron origen a la vida al menos en la Tierra.

Las meteoritas se clasifican en grupos diversos de acuerdo a su contenido mineral, composición química y estructura. Una revisión amplia del tema queda fuera de los propósitos del trabajo y solamente se verán con mayor detalle las del primer grupo, por ser las más primitivas, abundantes en volátiles y con un contenido químico y mineral que incluye en algunas de ellas materiales orgánicos precursores de la vida. Las Tablas I y II resumen las características distintivas de las meteoritas en función de su mineralogía y química elemental, lo cual proporciona información crucial sobre las condiciones de oxidación-reducción presentes durante su formación.

Meteoritas carbonosas

Las meteoritas carbonosas (2.8 % del total), como su nombre lo indica, tienen un contenido de carbón en forma elemental (diamante, grafito, fullerenos, carbón amorfo) o bien en forma de materia orgánica y que varía entre <1% hasta >20% en peso. Este tipo de meteoritas es muy escaso entre las pétreas,

Clase	Metales (%)	Sulfuros (%)	Silicatos + vidrios + óxidos (%)	Abundancia relativa (%)
Metálicas	>90	0-10	<1	4.5
Pétreas	15-20	<10	>80	94.5
Mixtas	30-40	<1	40-70	1.0

Tabla I. Clasificación y abundancia de los tres grandes grupos de meteoritas encontradas en la Tierra en función de su composición mineral, con un total publicado hasta 2005 de 17,108 muestras (Trot *et al.*, 2005)^a.

Condritas (%) del total	Hierro Total	Hierro Metálico	Óxidos de Hierro
H (45)	Dominante	Abundante	Escaso
L (40)	Escaso	Escaso	Abundante
LL (10)	Escaso	Escaso	Dominante
E (2)	Escaso	Dominante	Escaso
Carbonosas (3)	Variable	Escaso	Muy escaso

Tabla II. Clasificación de las meteoritas en función de su contenido relativo y absoluto del elemento hierro.

pero constituye el grupo más significativo por cuanto a la información que contiene respecto a los procesos de evolución química prebiótica de la materia orgánica ocurridos durante los inicios de formación del Sistema Solar. La Tabla III resume las características esenciales de las condritas carbonosas más estudiadas por la ciencia.

En general el carbón extraterrestre aunque está enriquecido en ^{13}C , tiene una relación semejante de los isótopos de H (deuterio e hidrógeno). Sin embargo, el valor isotópico D/H en los 40 aminoácidos estudiados de las meteoritas Murchison y Murray ($+300 \times 10^{-6}$ a $+3600 \times 10^{-6}$) está muy por encima del valor estándar de los materiales orgánicos y del agua terrestre, cuyo valor es de $+150 \times 10^{-6}$. Estos valores relativamente tan elevados indican su origen en el ambiente frío de la nebulosa presolar, y por tanto una química prebiótica compleja que se dio en el medio interestelar antes de la formación de la Tierra. Es importante mencionar que de los más de 40 aminoácidos identificados en Murchison y Murray solamente ocho están presentes también en los seres vivos de la Tierra. Algunos aminoácidos de Murchison y Murray (Pizzarello & Cooper, 2001)⁹, que son raros en la biósfera terrestre, presentan cierta quiralidad, propiedad física sin planos de simetría que caracteriza a la materia viva, y que tal vez fue producto de la polarización circular de la luz ultravioleta que se dio en la nube molecular antes de la formación del Sistema Solar, aunque también existe un debate sobre el origen de esta quiralidad.

La meteorita Allende: La madre de todas las rocas

A la 1.05 a.m. de la madrugada del 8 de febrero de 1969, en la región del poblado de Allende (Ranchito de Allende, Chihuahua) centenares de fragmentos y varias toneladas de un material extraterrestre se precipitaron a lo largo de una elipse de aproximadamente 40x8 km en dirección NNE. Apenas unos cuantos días después, su estudio científico había producido el primero (King Jr. *et al.*, 1969)¹⁰ de los millares de artículos que vendrían luego dando a conocer una gama impresionante de información mineralógica, petrológica, química, geocronológica e isotópica, la cual ha dado a la meteorita Allende elementos suficientes para que se le considere sin duda la madre de todas las rocas. La caída de Allende (no me refiero al héroe de nuestra independencia) transformó el conocimiento científico universal al poner a disposición de los estudiosos del tema material abundante para su análisis en prácticamente todos los centros de investigación y laboratorios del mundo. Allende representa, la meteorita carbonosa más grande registrada en la historia de la ciencia, con un peso total de sus fragmentos recuperados superior a las dos toneladas que incluyen algunos de los materiales más antiguos del Sistema Solar ($\sim 4,567$ Ma). Después de Allende, el conocimiento científico sobre la evolución de nuestro entorno galáctico avanzó de manera notable en los aspectos siguientes:

a) Ahora sabemos la edad exacta del nacimiento (condensación) del Sistema Solar, b) se confirmó el estallido frecuente de supernovas en la historia galáctica como un proceso cósmico

Meteorita (% C)	Año	Lugar	Clasificación	Orgánicos principales	d D%	d ^{13}C %	Masa (kg)
Orgueil (3.75 a 20)	1864	Pirineos, Francia	CI1	Formaldehído, aminoácidos quirales, ácidos carboxílicos etc.	+602 a +1270	+4 a -20	14
Murray (2.1 a 12.5)	1950	Kentucky, USA	CM2	Alcoholes, aminoácidos (17 no son terrestres), etc.	+312 a +994	$\sim +40$	12.6
Murchison (2.5 a 12.2)	1969	Victoria, Australia	CM2	>240 aminoácidos, alcoholes, ácido fórmico, etc.	+660 a +2024	+ 32.5	100
Allende (0.3 a 0.17)	1969	Allende, Chihuahua	CV3	Fulerenos, >40 compuestos orgánicos (1969), PAHs, etc.	+120	-16 a -17	>2,000
Tagish Lake (4.5 a 13.5)	2000	British Columbia, Canadá	C2 (sin grupo)	Aminoácidos, piridina, ácidos carboxílicos, fulerenos, PAHs, etc.	+930	+5.5 a +22.9	10

Tabla III. Las meteoritas carbonosas más estudiadas del mundo cuya caída fue observada.

fundamental para iniciar el colapso de las nubes moleculares de donde surgen estrellas y planetas como los de nuestro Sistema Solar, c) las escalas del tiempo de condensación y formación planetaria se redujeron considerablemente con el descubrimiento en Allende de elementos radiactivos (generadores de calor) de vida muy corta como el ^{26}Al , d) la evolución geoquímica de la Tierra se logró estandarizar con mayor rigor a partir del estudio de Allende como una muestra primordial de referencia mundial, e) con el descubrimiento en Allende de los ICAs (inclusiones ricas en calcio y aluminio) se confirmó un estado térmico muy elevado del disco solar hasta distancias de 1.5 UA (UA: unidad astronómica equivalente a 150 millones de kilómetros, que es la distancia media entre el Sol y la Tierra).

LA FORMACIÓN DE LA LUNA, UN EVENTO CÓSMICO QUE DESPOJÓ DE TODO MATERIAL VOLÁTIL (GASES Y ALGUNOS METALES LIGEROS) A LA TIERRA

Casi al terminar de formarse la Tierra, hace ~4,530 Ma, sufrió el impacto de un último embrión planetario (Theia, Figura 2)

que fue de enormes consecuencias para su evolución química e imposibilitando la formación de la vida durante esa época, pues el evento habría volatilizado cualquier océano de agua o atmósfera que habría tenido la Tierra luego de la formación de su núcleo dejando en cambio un océano de magma activo por millones de años, donde la vida tampoco podría desarrollarse. Las simulaciones numéricas del fenómeno muestran como la Tierra (Sleep *et al.*, 2001)¹¹, (Canup & Asphaug, 2001)¹² habría secuestrado el núcleo metálico del impactor (Figura 2), mientras su manto silicatado era evaporado para después condensarse y formar la Luna. El proceso del impacto mismo pudo tomar sólo algunas horas pero la condensación de los escombros tal vez duró muchos miles de años. Otra hipótesis novedosa (Canup, 2012)¹³ considera que la colisión se dio, pero entre dos cuerpos de masa similar chocando con una velocidad de apenas 4 km/seg, pero de consecuencias análogas al modelo anterior.

Entre las evidencias más relevantes que se han dado para justificar la hipótesis se cuentan: a) la edad de la Luna es muy

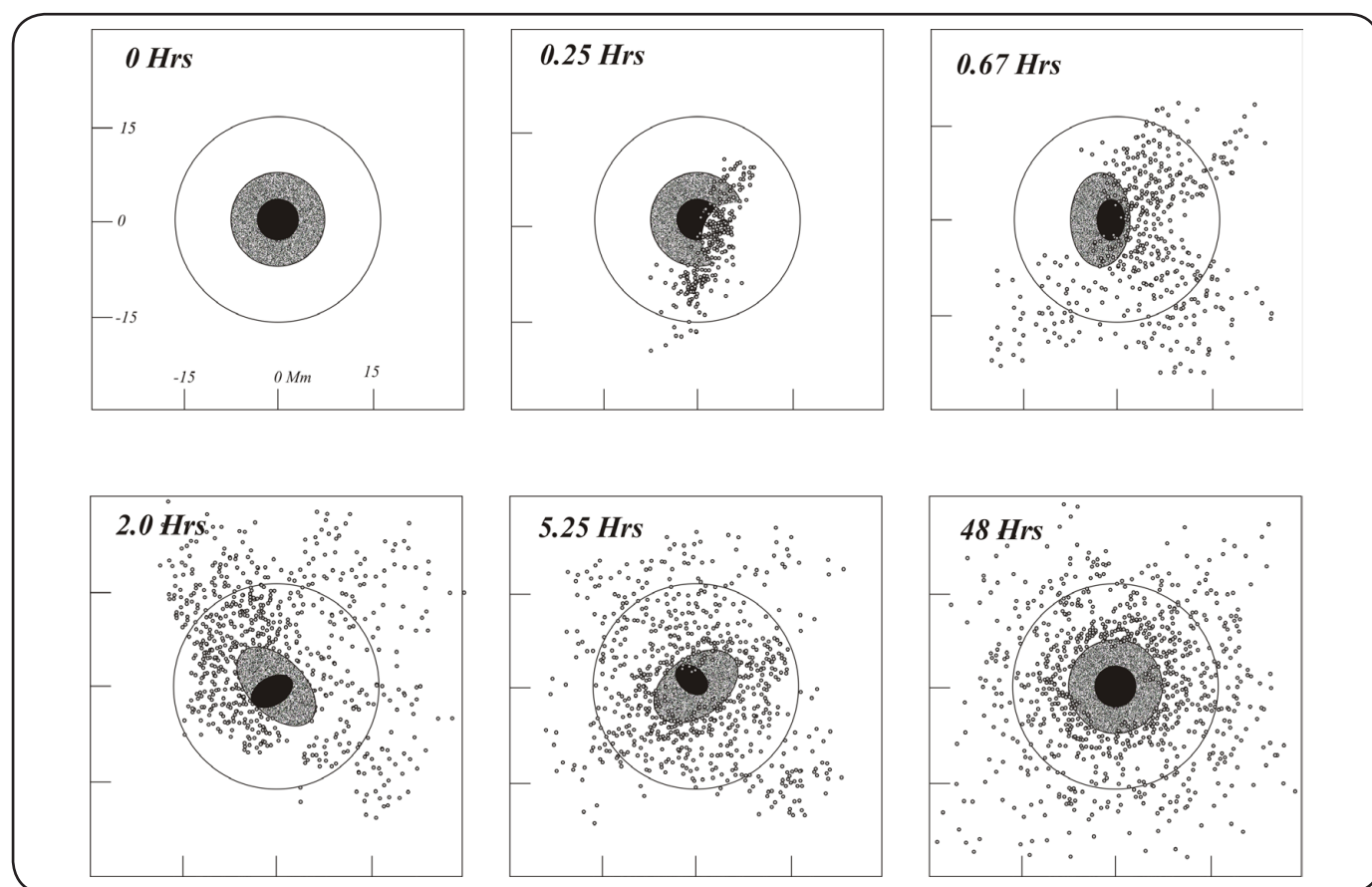


Figura 2. Simulación numérica del impacto que habría formado hace unos 4,500 Ma a la Luna por colisión de un planeta embrionario llamado Theia (madre de la luna) (0.05 % de la masa terrestre) a una velocidad de 20 km/seg, contra una Tierra ya construida (figura modificada después de Cuk & Stewart, 2012)¹⁴. La parte negra representa el núcleo y la tonalidad gris el manto de la Tierra en el momento de ser impactada por Theia; el proceso se habría completado en 48 horas, pero la luna se condensaría en un periodo mucho más prolongado a partir del manto evaporado de ambos cuerpos planetarios.

joven (4,500 Ma) para ser un embrión planetario capturado por la Tierra, b) la Luna en esencia es anhidra, pues nació devolatizada por la energía asociada al impacto de su formación, c) el potasio en la Luna es deficiente, pues a pesar de ser un metal, también se habría volatizado durante el impacto, d) la relación de masa Luna/Tierra es muy alta (1/81) comparada con otras lunas y sus planetas respectivos en el Sistema Solar, y e) el momento angular Luna-Tierra se explica mejor asumiendo un origen común de ambos cuerpos durante un impacto.

EL GRAN BOMBARDEO TARDÍO (GBT)

Luego de formada la Luna, la Tierra y todos los cuerpos interiores del Sistema Solar 530-480 Ma después probablemente sufrieron el impacto tardío de millares de cuerpos asteroidales

(planetesimales) y/o cometas kilométricos, evento que pudo tener consecuencias enormes para originar la vida o provocar su extinción, si es que ya había surgido antes de este evento (Figura 3). El suceso más importante después de terminada la acreción planetaria con la formación de la Luna, fue la llegada de una lluvia de objetos menores, asteroides y cometas, que bombardearon todos los cuerpos del Sistema Solar interior durante una época más o menos bien determinada entre 4,000 y 3,850 Ma. El hecho de que esta superficie craterizada por los impactos no se manifieste en la Tierra actual (su cráter grande más antiguo es el de Vredefort en África del Sur, con una edad aproximada de 2,020 Ma) se debe a la actividad tectónica continua que ha borrado casi todo el registro de procesos anteriores a los 4,000 Ma. Sin embargo, las edades

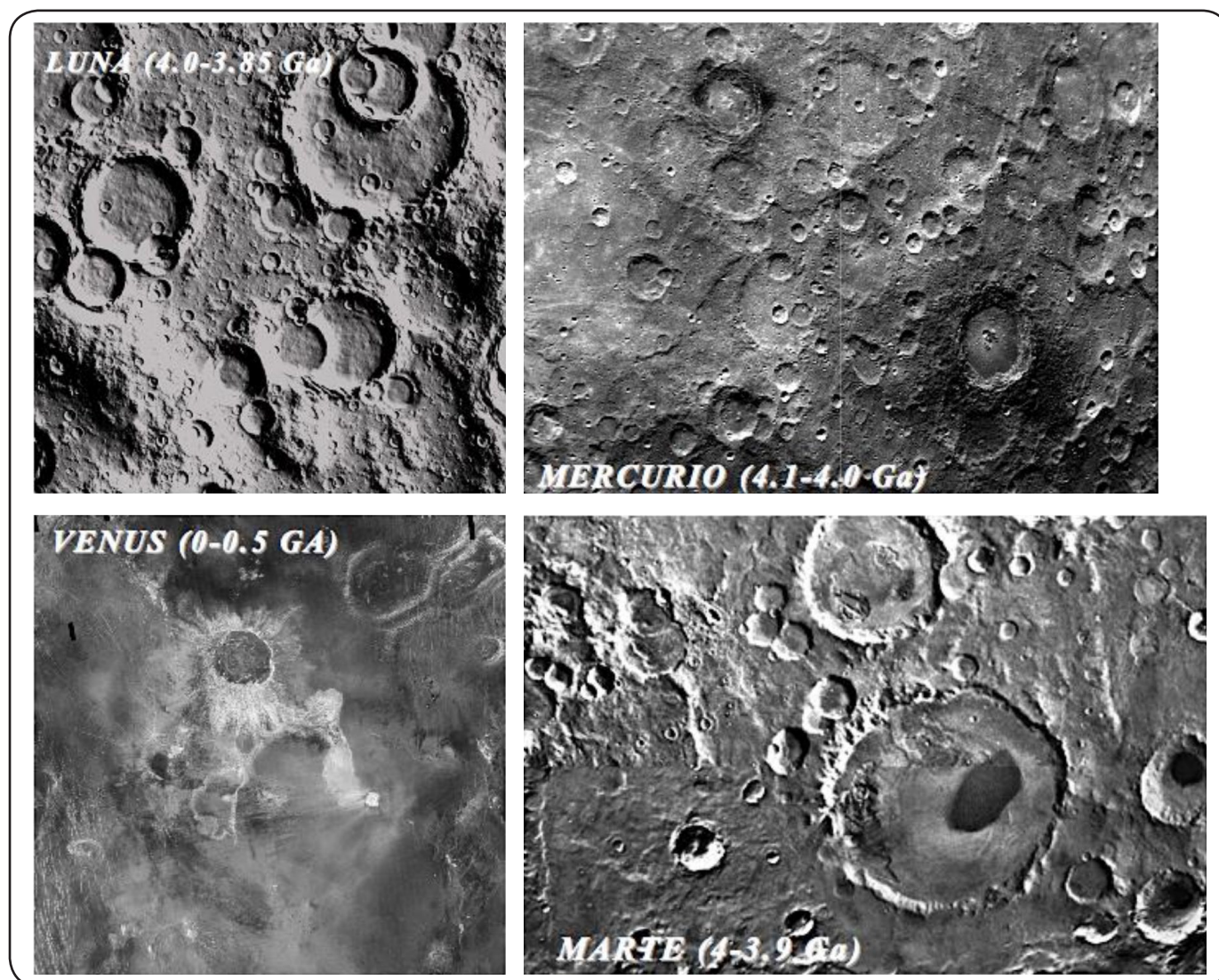


Figura 3. Superficies craterizadas de varios cuerpos planetarios del interior del Sistema Solar y el rango estimado de sus edades. En la Tierra como en Venus, por su actividad geológica sostenida desde su formación, se ha borrado casi toda la evidencia del proceso.

absolutas y relativas de rocas (*in situ* y meteoritas) y vidrios lunares, así como una meteorita (ALH84001), la presencia de cráteres en todos los cuerpos del Sistema Solar interior, capas gruesas con esférulas de vidrio en el registro Arqueano de la Tierra (>2500 Ma), y el exceso de gases nobles en la hidrósfera y atmósfera terrestres con relación a su manto, constituyen evidencias acumuladas que apuntan en la dirección de la existencia real de ese fenómeno, cuyo pico habría ocurrido hace 3,900 Ma. La intensidad del fenómeno se calcula entre 200 y 1,000 veces el flujo actual de grandes impactores (Chicxulub, por ejemplo), y que habría durado entre 200 y 60 Ma depositando una masa de 8.4×10^{18} kg en la Luna, lo que implica por lo menos una masa añadida de 1.2×10^{21} kg para la Tierra (aproximadamente la seis milésima parte de su masa total). Este material extraterrestre equivale al depósito de 200 ton/m² en su superficie terrestre con una energía total asociada de alrededor de 2.5×10^{29} julios (Figura 4), suficiente para fundir, si toda la energía fuese transferida a la superficie rocosa, una masa mayor a los 10^{23} kilogramos, o bien un volumen equivalente de 3.3×10^{10} km³, que es aproximadamente igual al de toda la corteza de la Tierra.

Los cráteres más antiguos y más grandes de la Tierra

Los cráteres más antiguos preservados en el registro geológico de la Tierra son Vredeford, Sudáfrica con 250-300 km de diámetro, una geometría multianillada y una edad de 2023 ± 4 Ma, y el Suavjarvi en Karelia con 16 km de diámetro y 2,400 Ma de edad.

El gran debate que se plantea entre los que postulan el GBT como un evento real en la historia temprana de los planetas incluye las interrogantes siguientes: ¿Fueron los cometas y/o los asteroides (meteoritas *sensu lato*) los objetos que importaron de regreso a la Tierra el material volátil perdido durante la formación de la Luna? O bien, ¿la Tierra se ha desgasificado gradualmente desde el interior a partir del material volátil conservado en los silicatos (olivino, granate y piroxenas) nominalmente anhidros? En este sentido, las estimaciones basadas en la relación D/H (deuterio/hidrógeno) del manto terrestre profundo (400-3,950 km) asignan los posibles porcentajes de procedencia para el agua actual en los mares terrestres ($D/H \times 10^{-6} = 149$) siguientes (Dauphas *et al.*, 2000)¹⁵: desde el interior de la Tierra, 50-90 % ($D/H \times 10^{-6} = 128-153$); por los asteroides, 0-50 % ($D/H \times 10^{-6} = 159-181$); y por los cometas, 0-10 % ($D/H \times 10^{-6} = 311 \pm 13$).

Sin embargo, la causa y duración del fenómeno no se han aclarado de manera general, pues prevalecen las escuelas gradualista y la catastrofista (Figura 5). La primera establece que los grandes impactos sólo representan un segmento de una curva de acreción planetaria que disminuía exponencialmente y de manera continua, mientras que la escuela catastrofista especifica la concentración en un pico definido entre los 4 y 3.85 Ga (giga años), el cual interrumpió la continuidad decreciente

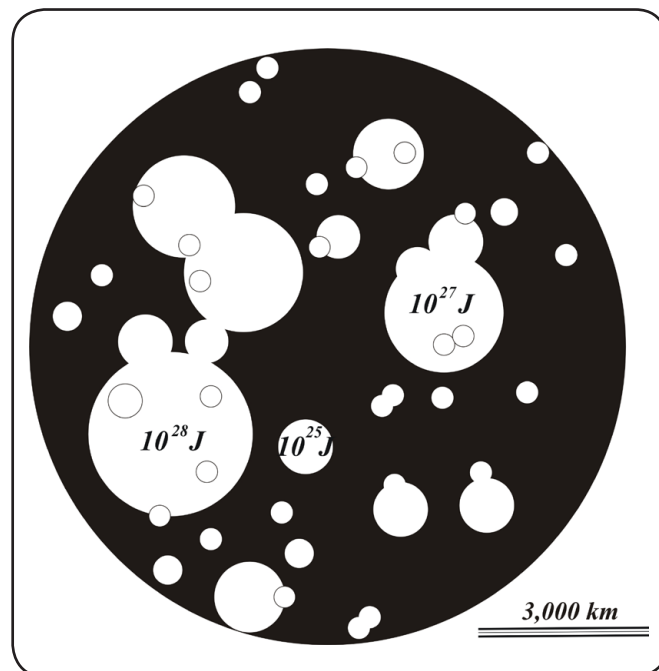


Figura 4. Imagen del estado posible en que podría haber quedado la Tierra después del GBT en términos del desarrollo de cráteres con diámetros mayores que 300 km. Varias decenas de cuencas alcanzarían más de 1,000 km de diámetro, y por lo menos cuatro habrían llegado a los 3,000 km. ¿Pudo la vida ser creada o conservada bajo este bombardeo cuyo nivel energético fue capaz de extinguir océanos enteros y erosionar un porcentaje grande de la atmósfera? Según la mayoría de los investigadores no, pero otros como Mojzsis y sus colaboradores (Abramov, & Mojzsis, 2009)¹⁶ han simulado numéricamente el fenómeno reforzando la posibilidad de que la vida, la cual según ellos ya existía, no haya sido extirpada por completo, sino que se refugió en el interior de la corteza terrestre, aun frente a impactos con la energía contenida ($\sim 10^{28}$ julios) en cuerpos de hasta 300 km de diámetro viajando a más de 20 km/segundo y desprendida en unas cuantas horas.

de la curva de evolución planetesimal. El peso mayor de la evidencia actualmente favorece a la escuela catastrofista, y esa temporalidad del evento (3.9-3.8 Ga) curiosamente corresponde al mismo periodo en que aparentemente se han encontrado los vestigios químicos más antiguos de vida en el planeta (Mojzsis *et al.*, 1996)⁴.

Efectos inmediatos y prolongados sobre el ambiente asociados con los grandes impactos

Los impactos entre grandes cuerpos celestes desprenden siempre cantidades enormes de energía ($\geq 10^{27}$ julios) debido a las masas (trillones de toneladas) y velocidades (10-70 km/seg) involucradas. Esta energía, al desprenderse súbitamente en el ambiente, se transforma en calor y deformación, todo lo cual funde, volatiliza y remueve las rocas afectadas, cava grandes

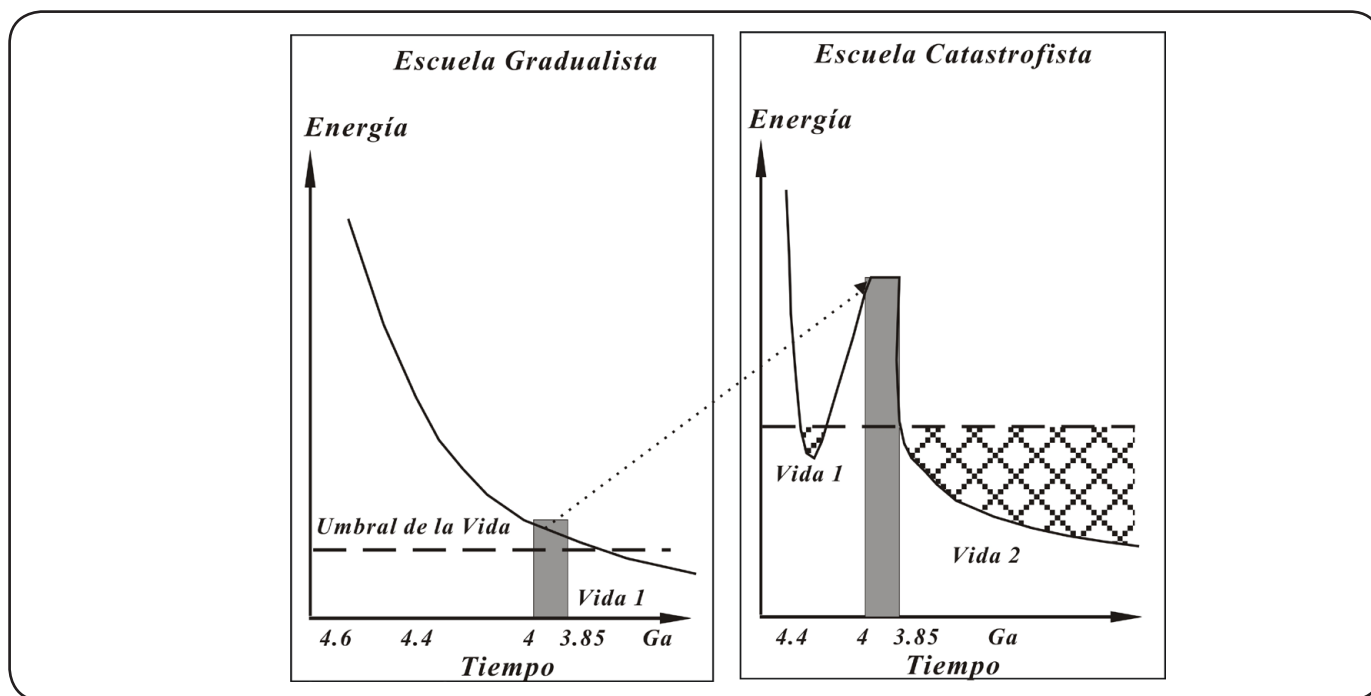


Figura 5. Diagrama energía/tiempo que muestra dos conceptos opuestos sobre la historia geológica de los eventos de acreción planetaria y las posibilidades ambientales para la aparición de la vida en la Tierra. La escuela gradualista sostiene que dicha acreción ocurrió de manera continua, disminuyendo exponencialmente su energía hasta permitir por una sola ocasión la generación de la vida entre 4 y 3.85 Ga, mientras que la escuela catastrofista argumenta que la energía de acreción permitió en tiempos mucho más remotos (4.4 Ga) su generación, para ser luego destruida por el Gran Bombardeo Tardío (barra gris del diagrama). La vida, según esta escuela, habría vuelto a formarse luego que cesó el evento hace unos 3.85 Ga.

cráteres, arroja volúmenes considerables de escombros alrededor del impacto y calienta océanos y atmósferas al grado de erosionar o vaporizar parte de esas esferas planetarias esenciales para la vida. Pero también pueden tener efectos benéficos (Cockell, 2006)¹⁷ como la adición de volátiles reductores: el CH_4 , NH_3 , CO , y HCN , considerados como nutrientes prebióticos, y desde luego modificar profundamente las condiciones y velocidad de las reacciones químicas en los sistemas terrestres superficiales (océano, suelo, hidrósfera y atmósfera). Sin embargo, estos efectos pueden en situaciones extremas (energías superiores a los 10^{27} julios) conducir a la extirpación de cualquier paleobiósfera que existiese en el momento del impacto (p. ej. Levy & Miller, 1998)¹⁸ o sólo lograrlo parcialmente si la vida se refugiase en el subsuelo profundo, como proponen otros autores (p. ej. Abramov & Mojzsis, 2009)¹⁶.

LA VIDA BAJO CONDICIONES EXTREMAS

La delicada estructura y complejidad química de la materia viva está formada esencialmente por elementos más volátiles como son los gases H, O, y N, y desde luego por el elemento sólido denominado carbón (C), todo lo cual, aunado a la abrumadora cantidad de componentes atómicos y moleculares que tienen los compuestos químicos esenciales para la vida como son las proteínas y los ácidos nucleicos (ARN y ADN),

impone límites severos para su estabilidad termodinámica bajo cualquier ambiente dado de la naturaleza. La Tabla IV ilustra de manera sucinta los límites impuestos por factores ambientales físicos y químicos como son humedad, temperatura, presión, acidez/alcalinidad, salinidad y concentraciones tóxicas de metales, o también la radiación de altas energías (ultravioleta y cósmica). Cualquiera de esos valores límite, o una combinación de ellos, aún si se exceden por tiempos muy cortos, impedirían la formación y el desarrollo de la vida. En este marco termodinámico es posible e importante comparar esas condiciones físicas y químicas con las que pudieron darse durante y después de los eventos catastróficos que acompañaron a los grandes impactos meteoríticos al principio de la vida del planeta Tierra.

Considerando que la variable más importante en relación con el origen de la vida es la temperatura, ya que ésta impone al agua sus límites inferior y superior que le permiten permanecer líquida (-22°C a presión de 2,100 atmósferas, y 374°C a la presión crítica de 220 atmósferas), los hábitats para la formación de la vida necesariamente fueron global o regionalmente destruidos durante la mayoría de los impactos cuya energía alcanzó más de 10^{27} julios. Al respecto, las opiniones basadas en estudios teóricos y simulación numérica difieren entre los que consideran

Parámetros físico-químicos	Humedad	Temp. °C	Presión (atmósferas)	pH	Salinidad ($\alpha\text{H}_2\text{O}$)	Metalicidad
Límites tolerables	Agua en estado líquido	-18 a 104	0.1 a 1,400	-2 a 12	1 a 0.7	Variable, según el tipo de metal

Tabla IV. Condiciones físico-químicas límite principales para la supervivencia de la vida en la Tierra.

que después de la formación de la Luna (2×10^{31} julios), los impactos más grandes (asteroides o cometas con diámetros hasta de 300 km) no fueron capaces de extirpar la vida por completo si ésta ya existía (p. ej. Abramov & Mojzsis, 2009)¹⁶, y los que consideran (p. ej. Sleep *et al.*, 1989)¹⁹ que océanos completos eran evaporados y que temperaturas por encima de los 200 °C prevalecieron por miles de años en la superficie del planeta, luego de un gran impacto como los millares que sufrió la Tierra hace unos 3,900 Ma, justo cuando se habría comenzado o regenerado la vida en este planeta.

Las Figuras 6 y 7 ilustran gráficamente la evolución de los grandes eventos de los mundos físico, químico y biológico que marcaron el nacimiento del planeta Tierra, la única región del universo conocido donde hay vida.

CONCLUSIONES

1. Las meteoritas (*sensu lato*) conservaron desde el principio de la formación del Sistema Solar los ingredientes

químicos necesarios que pudieron contribuir al reservorio de compuestos orgánicos complejos necesarios para la formación de los primeros seres vivos.

2. Las meteoritas pudieron ser los agentes renovadores de la mayoría de los compuestos y elementos químicos volátiles necesarios para formar la vida en la Tierra, incluyendo el agua, elementos que se habrían perdido catastróficamente (en unas 48 horas) al formarse la Luna.
3. Las meteoritas y sus impactos asociados han generado durante la evolución geológica de la Tierra sistemas dinámicos plenos de energía y nutrientes para acelerar los procesos de evolución química prebiótica hasta la vida.
4. Los impactos meteoríticos más grandes pudieron ser también factor de extinción de esos sistemas vitales.
5. Geología y Meteorítica implican procesos naturales intrínsecamente ligados con la historia temprana de la Tierra, los cuales lograron generar la vida sólo 1,000 Ma después de formado el planeta.

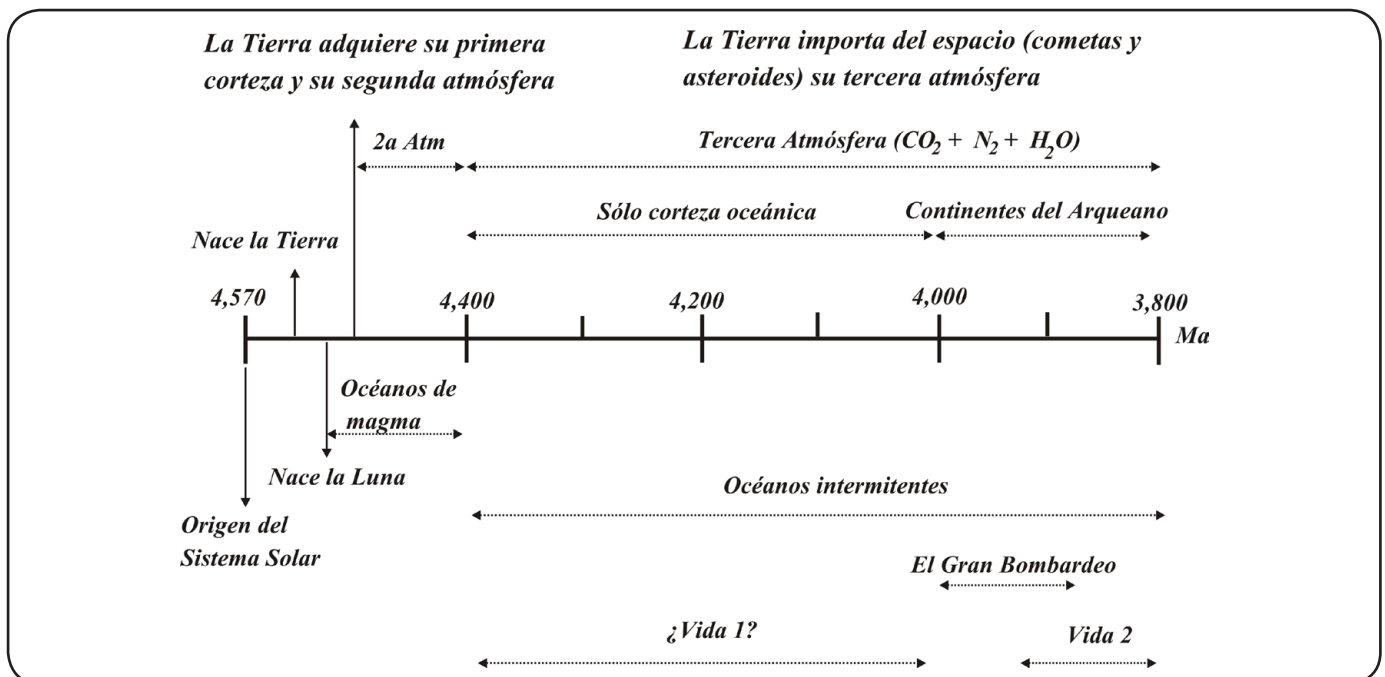


Figura 6. Cuadro sinóptico que marca la evolución geológica de los principales sistemas naturales del planeta Tierra durante sus 4,570 Ma de historia integral.

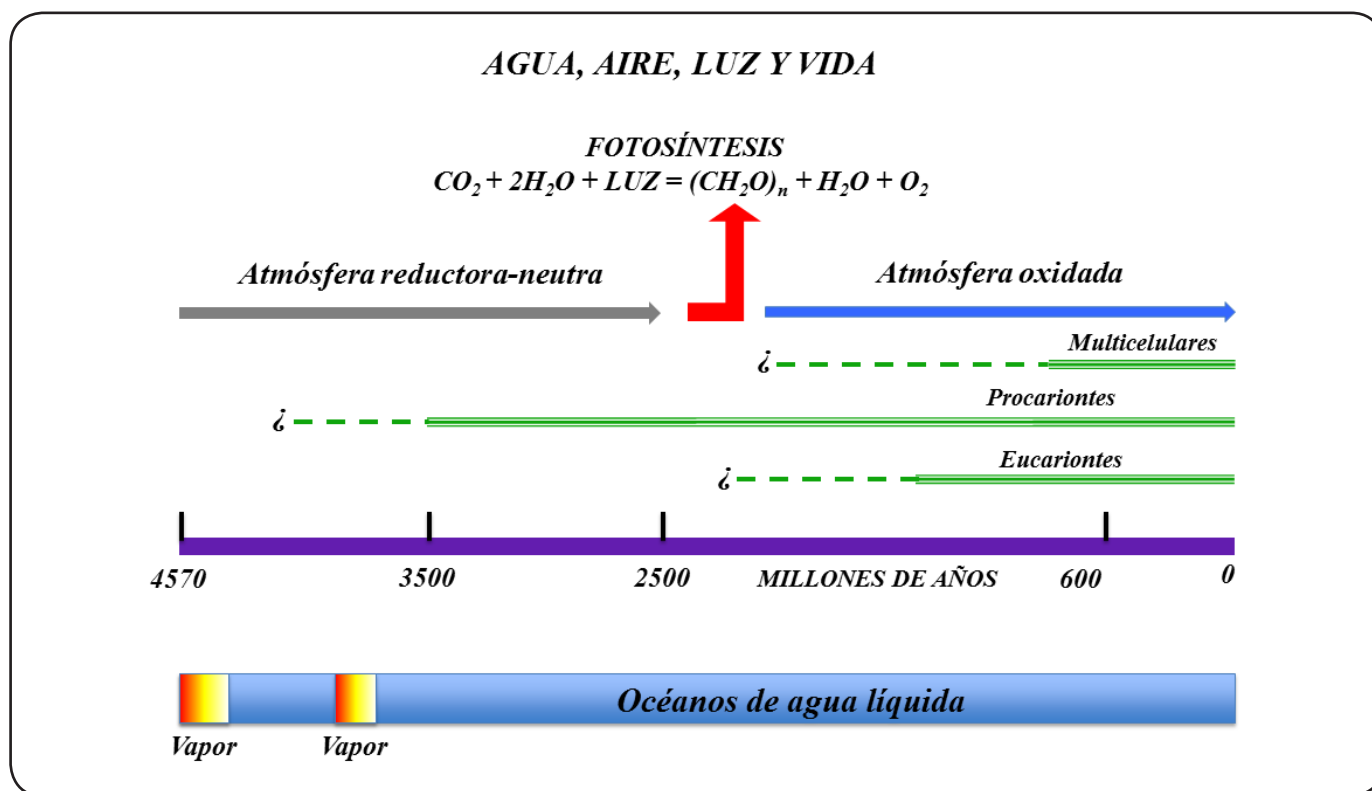


Figura 7. Síntesis gráfica de la evolución de los sistemas vivos del planeta en relación con la coevolución de los océanos y atmósferas terrestres, sistemas que dieron refugio y alimento a la vida cuando colosales catástrofes cósmicas amenazaron su formación o desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Las reflexiones anteriores no habrían sido posibles sin la inspiración y discusiones que acompañan siempre nuestras conversaciones transdisciplinarias en el Seminario Interdisciplinario sobre el Origen de la Vida (SIOV) con sede en la UNAM. Sin embargo, los puntos de vista expresados son responsabilidad exclusiva del autor. Deseo dar las gracias a la Lic. Gemma Quintero por la invitación a escribir este ensayo, y particularmente por su sensibilidad, paciencia e interés sostenidos para que este trabajo llegara a su culminación.

REFERENCIAS

- O'Neil, J., Carlson, R.W., Francis, D. & Stevenson, R.K. Neodymium-142 evidence for Hadean mafic crust. *Science* **321**(5897), 1828-1831 (2008).
- Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H. & Graham, C.M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature* **409**, 175-178 (2001).
- Schopf, J.W. Microfossils of the Early Archean Apex chert: New evidence of the antiquity of life. *Science* **260**, 640-646 (1993).
- Mojzsis, S.J. *et al.* Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature* **384**, 55-59 (1996).
- Benner, S.A. Defining life. *Astrobiology* **10**, 1021-1030 (2010).
- Bedau, M.A. An Aristotelian account of minimal chemical life. *Astrobiology* **10**, 1011-1020 (2010).
- Orgel, L.E. Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world. *Critical Review in Biochemistry and Molecular Biology* **39**, 99-123 (2004).
- Trot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A. & Scott, E.R.D. Classification of meteorites: In, *Meteorites, Comets and Planets*, (ed. A.M. Davis), v. 1, Treatise on Geochemistry (eds. H.D., Holland, and K.K. Turekian), Elsevier-Pergamon, p. 83-128 (2005).
- Pizzarello, S. & Cooper, G.W. Molecular and chiral analyses of some protein amino acid derivatives in the Murchison and Murray meteorites. *Meteoritics and Planetary Science* **36**, 897-909 (2001).
- King Jr., E.A., Schonfeld E., Richardson, K.A. & Eldridge, J.S. Meteorite fall at Pueblito de Allende, Chihuahua, Mexico: Preliminary information. *Science* **163**(3870), 928-929 (1969).
- Sleep, N.H., Zanhle, K. & Neuhoff, P.S. Initiation of clement surface conditions on the earliest Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **98**(7), 3666-3672 (2001).
- Canup, R.M. & Asphaug, E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of Earth's formation. *Nature* **412**, 708-712 (2001).
- Canup, R.M. Forming a Moon with an Earth-like Composition via a Giant Impact *Science* **638**, 1052-1055 (2012).
- Cuk, M. & Stewart, S.T. Making the Moon from a fast-spinning

- Earth: A giant impact followed by resonant despinning. *Science* **338**, 1047-1052 (2012).
15. Dauphas, N., François, R. & Marty, B. The late asteroidal and cometary bombardment of Earth as recorded in water deuterium to protium ratio. *Icarus* **148**, 508-512 (2000).
16. Abramov, O. & Mojzsis, S.J. Microbial habitability of the Hadean Earth during the late heavy bombardment. *Nature* **459**, 419-422 (2009).
17. Cockell, C.S. The origin and emergence of life under impact bombardment. *Philosophical Transactions Royal Society B* **361**, 1845-1856 (2006).
18. Levy, M. & Miller, S.L. The stability of the RNA bases: Implications for the origin of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **95**, 7933-7938 (1998).
19. Sleep, N.H., Zahnle, K.J., Kasting, J.F. & Morowitz, H.J. Annihilation of ecosystems by large asteroid impacts on the early Earth. *Nature* **342**, 139-142 (1989).