

Trabajos de revisión de la frontera de un campo, de manera que sea utilizable para la docencia.

Evolución química y el origen de la vida*

A. Negrón-Mendoza,¹ S. Ramos-Bernal,¹ y F. G. Mosqueira²

Abstract (*Chemical evolution and the origin of life*)

Chemical evolution is essentially the process by which simple compounds lead to the generation of organic compounds essential for the development of life. This topic yields insight into the main steps prior to the appearance of life on Earth. We review some important aspects of this problem.

I. Introducción

El interés de la humanidad por el conocimiento sobre el origen de la vida tienen raíces muy profundas. Este problema es multifacético y ha engendrado numerosas controversias y discusiones, que al principio fueron de una naturaleza religiosa y filosófica. No fue sino a principios del siglo XX que se comenzó a estudiar desde la perspectiva científica. Ya Bernal, en 1951, refiriéndose a esta cuestión expresó que un problema de proporciones cósmicas como lo es el origen de la vida, requiere de una perspectiva multidisciplinaria.

Desde el punto de vista científico, las primeras ideas sobre el surgimiento de la vida en la Tierra provienen de Oparin (1924) y Haldane (1929), quienes en forma independiente propusieron una hipótesis que trata de explicarlo. En forma resumida esta hipótesis establece que la acumulación de materia orgánica, su transformación en moléculas más complejas y la formación de sistemas que se repliquen, son factores que condujeron a la aparición de seres vivos en la Tierra. De esa forma, los seres vivos son el resultado de una evolución continua de la materia. Este proceso transita por una etapa pre-biológica que consiste en una transformación química desde moléculas simples inorgánicas hasta las moléculas que posiblemente utilizaron las células primigenias. Este

proceso recibe el nombre de evolución química o molecular y pretende descubrir los fenómenos físicos y químicos que influyeron en la formación y organización de compuestos orgánicos e inorgánicos primitivos y que sirvieron como base al surgimiento de seres vivos. Aunque sólo conocemos vida en la Tierra, los procesos de evolución química se extienden más allá de ella y abarcan otros cuerpos celestes como planetas, cometas y nubes interestelares, (*i.e.*, regiones del espacio donde se encuentra materia condensada). Esta evolución cosmoquímica implica que la materia tuvo un origen y evolución común. En la Tierra, ésta se inicia desde la formación del planeta hace 4,500 millones de años (Milton y Steiger, 1965) hasta la aparición del fósil más antiguo conocido y que data de la era Arqueana o Arcaica (y forma parte del Eón Precámbrico), aproximadamente entre 3,500-3,200 millones de años (Schopf, 2000). Sin embargo, con base en argumentos geoquímicos, tales como la temperatura de la Tierra; el bombardeo interplanetario por cuerpos extraterrestres que sufrió la Tierra en sus primeras etapas; y otros eventos, el proceso de evolución molecular se ha reducido a pocos millones de años (Lahav, 1999).

2. Un panorama de los compuestos químicos de la vida contemporánea

Un aspecto fundamental en esta área de la ciencia concierne a la pregunta de qué moléculas fueron esenciales para el surgimiento de la vida. El ADN (ácido desoxiribonucleico) y las proteínas son los polímeros biológicos centrales en los organismos vivientes actuales. El ADN almacena la información genética. La información que guarda el ADN se expresa en las proteínas. Las proteínas hacen las funciones estructurales y catalíticas que son características de los organismos vivos. El ARN (ácido ribonucleico) es un eslabón entre el ADN y las proteínas; lleva la información genética codificada en el ADN a la maquinaria molecular para la síntesis de proteínas.

Un problema crucial para los estudios del origen de la vida, es la especulación y comprobación de que los primeros organismos contenían proteínas o ARN, o ambas. El dilema proteína/ARN ha sido resuelto,

¹ Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, A.P. 70-453, 04510 México, D.F.

² Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM, A.P. 70-487, 04510 México, D.F.

* Este trabajo fue solicitado a los autores por el Director de la revista.

al menos por el presente, a favor del ARN. Se ha descubierto la actividad catalítica en ciertas moléculas del ARN, los ribosomas (Cech y Bass, 1986). Esto indica que ARN pudo llevar a cabo la función de ambos, el ARN y las proteínas. Si esto es correcto, implicaría que los primeros organismos estaban compuestos de ARN. Esa biosfera hipotética es conocida como el 'mundo del ARN' (Gilbert, 1986). La vida después cambió de ARN a ADN y proteínas, porque estas moléculas son capaces de realizar las tareas de almacenamiento de información y catálisis de una manera más amplia y precisa.

Otras moléculas importantes en los organismos actuales son los fosfolípidos, los cuales componen las membranas; los ácidos grasos; los ácidos di y tricarbónicos relacionados con los procesos metabólicos; porfirinas como pigmentos; ATP, nicotinamida y sus derivados; y azúcares y bases nitrogenadas (los cuales también son parte de los ácidos nucleicos).

3. Estudios en evolución química

Desde el punto de vista científico el problema del origen de la vida lo podemos estudiar desde dos enfoques: el enfoque analítico y el sintético. En el enfoque analítico se tiene la información obtenida en estudios de astronomía, paleontología, biología, geología y otras disciplinas que nos presentan un panorama de cómo pudo ser la Tierra primitiva. Por otra parte, la simulación en el laboratorio de estas condiciones propuestas para el escenario primitivo y la transformación química de moléculas sencillas presentes en la Tierra primitiva —con la participación de fuentes naturales de energía— constituyen el enfoque sintético. Estos experimentos se conocen como experimentos simulados o síntesis prebióticas.

3.1 Enfoque analítico

Los procesos químicos que se llevaron a cabo en la Tierra primitiva estuvieron restringidos por las condiciones físicas y geológicas de la misma. Estas sujeciones determinaron su temperatura, presión y composición química del ambiente, aspectos que servirán para plantear experimentos apropiados en la química prebiótica.

Para entender los acontecimientos más importantes que llevaron al origen de la vida se han hecho estudios en varias disciplinas, entre ellos: se han examinado sedimentos y depósitos de minerales como el hierro; se han buscado fósiles que den información sobre la antigüedad y evolución de la

vida y estudiado objetos extraterrestres, como son muestras de meteoritos y rocas lunares, y se han realizado observaciones astronómicas para identificar la presencia de moléculas en diferentes cuerpos extraterrestres. Todo ello nos ha conducido a proponer el siguiente escenario que describimos a continuación.

3.1.1 Ambiente probable en la Tierra primitiva

Con base a las experiencias en diferentes disciplinas se ha presentado un panorama general de cómo se piensa que fue nuestro planeta en su inicio. Estas condiciones hipotéticas se pueden resumir así:

- 1) Una atmósfera neutra, formada por dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno; 2) temperatura moderada alrededor de 300 K, aunque con regiones de temperatura elevada; 3) el pH de los océanos cercano a 8; 4) presencia de diversas fuentes de energía libre que pudieron contribuir a la síntesis de compuestos orgánicos, tales como: rayos ultravioleta provenientes del sol; descargas eléctricas de los relámpagos; ondas de choque por el impacto de cometas y meteoros; energía térmica debida al vulcanismo y a la radiación ionizante, procedente de sustancias radiactivas, alcanzando ambos fenómenos una intensidad mucho mayor en tiempos pasados.

La importancia relativa de una fuente energética en las síntesis abióticas depende de su abundancia y distribución en el agua, la corteza terrestre y en la atmósfera, así como de su eficiencia para inducir reacciones químicas. La eficiencia depende a su vez, del porcentaje de conversión de reactantes en productos y también de que una vez formados éstos, puedan escapar de la acción destructiva de la fuente de energía.

3.2. Enfoque sintético

3.2.1 Lineamientos de la Hipótesis de Oparin-Haldane

De acuerdo a la hipótesis de Oparin-Haldane, los organismos vivos surgieron naturalmente sobre la Tierra primitiva a través de procesos de evolución química de la materia orgánica. En este proceso, el flujo de energía a través del ambiente prebiótico transformó las moléculas simples en compuestas biológicas complejas. Con el tiempo, estos compuestos fueron los precursores de las proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos bioquímicos. Otras de las grandes contribuciones de Oparin fue el proponer que los primeros organismos fueron heterótrofos, esto es, utilizaban compuestos orgánicos produ-

cidos en forma abiótica y disponible en el ambiente para sobrevivir. Haldane (1928) propuso la idea de la “sopa primitiva”. Ellos propusieron que la Tierra primitiva tendría una atmósfera reductora compuesta de metano, amoníaco, vapor de agua, un pH básico y temperatura moderada. Estas condiciones son necesarias para la acumulación de compuestos orgánicos, aunque en la actualidad se duda que haya existido tal atmósfera reductora.

Otros investigadores propusieron diferentes perspectivas para este problema. Alfonso L. Herrera (1868-1942) fue un científico mexicano prominente. Empezó sus experimentos con sustancias tales como formaldehído y tiocianato de amonio. A estos estudios les conoce como “teoría sulfocianica sobre el origen de la vida”. Estos experimentos, después de unas décadas han cobrado importancia, ya que representan la síntesis abiótica de aminoácidos conteniendo azufre (Perezgasga y col., 2004). Aunque muchas de las propuestas de Oparin-Haldane ya no son validas, son todavía relevantes para el estudio del origen de vida.

3.2.2 Simulaciones en el laboratorio

Mediante la simulación o recreación en el laboratorio de las condiciones que posiblemente existieron en la Tierra primitiva se intenta sintetizar compuestos importantes para la vida. Una premisa importante en este enfoque establece que las moléculas que tienen importancia en la actualidad, fueron impor-

tantes en el tiempo del origen de la vida. Tal premisa está basada en la composición molecular de la materia viva. ¿Cómo se formaron las moléculas en ambientes primigenios? El proceso por el cual se formaron es desconocido, pero se han propuestos modelos de síntesis a partir de moléculas muy simples. Los compuestos químicos pudieron formarse directamente a través de reacciones químicas de los componentes de la atmósfera, o en etapas, a través de intermediarios reactivos. Estos compuestos se condensaron ya sea en ambientes acuosos o más probablemente en la superficie de sedimentos. También se ha propuesto que las moléculas orgánicas llegaron a la Tierra por cometas y meteoritos. La síntesis de polímeros, en donde se requiere eliminar una molécula de agua por cada etapa de condensación entre dos monómeros, no es favorable energéticamente en un medio acuoso y requiere de una aportación de energía. En estos sistemas acuosos, Bernal (1951) propuso que en las orillas de los océanos o de los lagos, que ocasionalmente se secan y se vuelven a hidratar por las mareas altas, sería un lugar ideal para la síntesis de polímeros. Así, las moléculas orgánicas se adsorbían sobre las arcillas, ya sea en las orillas o en el fondo, y expuestas a la radiación solar y a otras fuentes de energía favorecieron la pérdida de agua y se pudieron sintetizar polímeros. Esta alternancia de secado e hidratación pudo haber sido un fenómeno natural importante en la Tierra primigenia.

El papel de las arcillas en química prebiótica abarca desde simples absorbedores de compuestos orgánicos, catalizadores de reacciones, hasta la controvertida propuesta de que las arcillas fueron los primeros genes (Cairns-Smith, 1966, 1982).

S. Miller y H. Urey de la Universidad de Chicago realizaron uno de los primeros experimentos en este campo en 1953. El aparato diseñado para este experimento contenía metano, amoníaco, hidrógeno y agua, a los cuales se les pasaba una descarga eléctrica. Varias sustancias se habían sintetizado, entre las cuales estaban los aminoácidos, ácidos grasos simples y urea. Aunque en la actualidad la existencia de la atmósfera reducida propuesta por Urey y Miller está refutada, esos experimentos abrieron las puertas a decenas de investigadores que tomaron un curso semejante y realizaron experimentos análogos, usando diferentes fuentes de energía, tales como calor, luz ultravioleta, radiación ionizante, y otras. En la figura 1 se presenta el aparato usado por Ponnamperruma para este tipo de síntesis. Todos estos nuevos

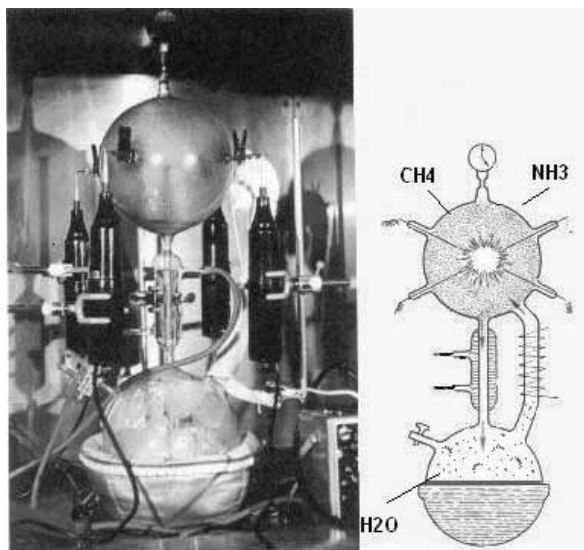


Figura 1. Aparato utilizado por Ponnamperruma y que simula la acción de los relámpagos en una atmósfera primitiva de metano, vapor de agua y amoníaco.

tipos de experimentación y simulación de condiciones prebiológicas han producido las moléculas esenciales para la vida, tales como los aminoácidos, purinas, pirimidinas, hidrocarburos, etcétera. La tabla I resume algunos ejemplos de las síntesis abióticas para diversos compuestos de importancia biológica.

Algunas reacciones químicas al azar pudieron formar una variedad de compuestos orgánicos, muchos de los cuales no fueron útiles al origen de la vida. La diversidad química improductiva se pudo limitar por efecto de fenómenos de catálisis que favorecieron las síntesis de moléculas específicas importantes para la vida; por ello, en química prebiótica es muy importante buscar esquemas de síntesis con sesgo, es decir, que sigan rutas preferenciales de polimerización y favorezcan la síntesis de un grupo limitado de productos (Negrón-Mendoza y Ramos-Bernal, 2004; Mosqueira *et al.*, 2000).

3.2.3 Cuellos de botella en las síntesis prebióticas

Son indiscutibles los grandes logros en la síntesis de compuestos de importancia biológica simulando ambientes terrestres primigenios o bien bajo condiciones extraterrestres. Sin embargo, una revisión crítica de la síntesis de muchos compuestos orgánicos revela que aún se requiere de mejores rutas de síntesis, en las cuales se incrementen sustancialmente los rendimientos y con ello se pueda demostrar que fue muy probable la acumulación de esos compuestos clave para la vida en el ambiente primigenio. Así, por ejemplo, Shapiro (1988) ha cuestionado la síntesis de la ribosa, un azúcar de seis átomos de carbono, presente en los ácidos nucleicos. Este compuesto se ha sintetizado por varias rutas; sin embargo, él señala varias objeciones: 1) el rendimiento sólo representa el 1% de material original; y 2) los azúcares son inestables en solución acuosa, particularmente si el pH es superior a 7 (Larralde, 1995). Así, hay todavía varios compuestos cuya síntesis presenta algunos problemas, tales como una precaria formación y condiciones experimentales no realistas.

Un problema fundamental en estos estudios lo constituye la formación de mezclas racémicas en los experimentos abióticos, siendo que los sistemas biológicos son muy selectivos en el tipo de isómeros D-L que utilizan. Todavía se requiere un gran esfuerzo para salvar tales dificultades.

La síntesis de macromoléculas como las proteínas, los polisacáridos y los ácidos nucleicos, representan un gran reto en los estudios de evolución

química, dada la complejidad y especialización de estos compuestos.

La investigación de la formación de polipéptidos se inició inmediatamente después de que se estableció la formación de aminoácidos en experimentos de síntesis abiótica. El problema fundamental es la condensación de dos aminoácidos liberando una molécula de agua para formar un enlace covalente entre ellos, el enlace peptídico. Esta reacción no está favorecida en un medio acuoso y se han propuesto diferentes mecanismos de condensación que incluyen el uso de agentes condensantes como la cianamida, monómeros “activados”, polifosfatos y en particular el uso de minerales arcillosos (Negrón-Mendoza y Ramos-Bernal, 2004). Fox y Dose (1977) han obtenido oligómeros hasta de 4,000 unidades atómicas de masa (uma) calentando mezclas de aminoácidos anhidros en presencia de excesos de l-sina, ácido aspártico o glutámico. Entre los principales problemas que se han presentado en la síntesis de este grupo de moléculas destaca que no todos los enlaces son de tipo peptídico.

La formación de biopolímeros también se ha estudiado por medios teóricos. El fenómeno de polimerización asociado a la vida requiere que este proceso sea altamente sesgado, *i.e.* no sujeto al azar puramente. De otra forma, la probabilidad de nucleación de un mínimo de oligómeros que pudieran formar un sistema vivo mínimo pudiera excluirse. Si este proceso fuera completamente al azar —es decir, sin ninguna clase de sesgo— la probabilidad de reacción entre dos clases de monómeros daría un conjunto de oligómeros sin probabilidad para poder formarlos otra vez (Mosquera, 1988, 2000, 2002). Por ello, se requiere establecer un principio de autoregulación, basado en las propiedades fisicoquímicas de los reactantes y que originen una reactividad sesgada (Fox y Dose, 1977). Así, con base en lo anterior, se han presentado modelos de polimerizaciones basados en Cadenas de Markov, que han podido reproducir datos experimentales (Mosqueira y col. 2000, 2002).

La síntesis de polinucleótidos se ha estudiado extensamente por los grupos de Orgel (Inoue y Orgel, 1982) y Ferris (Ferris y Ertem, 1992). Entre los resultados que han logrado obtener está la formación de oligómeros de 30-40 unidades, usando fosfoimidazoles. Debido al problema de la ribosa ya mencionado anteriormente, Orgel ha utilizado análogos simples de nucleótidos, como son el glicerol fosfato.

Tabla I. Ejemplos de síntesis prebióticas.

Autor	Mezcla de reacción	Fuente de energía	Comentarios
AMINOÁCIDOS			
Miller, 1953	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ , H ₂ O	Descarga eléctrica	Alanina, ácido aspártico, ácido glutámico, glicina, lisina, serina, valina, histidina, prolina, ornitina, isoleucina. En algunos casos los aminoácidos se formaron libres, en otros se obtienen después de realizar una hidrólisis
Bahadur, 1954	Formol, KNO ₂	Solar	
Fox, 1955	Fumarato y malato, NH ₄ ⁺	Calor	
Abelson, 1956	CO, N ₂ , ó NH ₃ , H ₂ O, H ₂	Descarga eléctrica	
Heyns, 1957	CO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O, H ₂ , H ₂ S, N ₂	U.V.	
Dose, 1957	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O, H ₂	Rayos X y gamma	
Oró, 1960	HCN	Calor	
Ferris y col., 1968	Cianoacetdeno, cianato, H ₂ O	Calor	
Steinman y col., 1968	Tiocranato de amonio		
Friedman y Miller, 1969	Fenilacetileno	Calor	
Bar-Num, 1974	CH ₄ , C ₂ H ₆ , NH ₃ , H ₂ O	Ondas de choque	
Yuasa y Oró, 1974	HCN, H ₂ O, M ₂ O ó M ₂ CO ₃	Calor	
Ventilla y Egami, 1977	Formol hidroxdamina, Fe ²⁺ , Mo ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Mn ²⁺ , Co ²⁺	Calor	
Lvanov y Slavcheva, 1977	Glicina, MnCO ₃ , Al ₂ O ₃	Calor	
Schwartz y Chittenden, 1977	β-alanina, urea, minerales arcillosos, acetato	UV	
Draganic y col., 1985	NH ₂ CN y HCN	Rayos gamma	
Draganic y col. 1985	HCN, CH ₃ CN, RCN, CH ₃ OH, HCO ₂ H		
PURINAS Y PIRIMIDINAS			
Lowe, y col., 1963	HCN, NH ₃	Calor	Se han sintetizado adenina, guanina, citosina, uracilo, adenosina, otros nucleótidos y nucleósidos
Oró, 1963	Acilonitrilo, NH ₄ Cl, urea	Calor	
Ponnamperuma y Sagan, 1963	Adenina y ribosa	UV	
Ponnamperuma y col., 1963	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O ó HCN	Electrones	
Sánchez y col., 1968	4 aminoimidazol-5-carbonitrilpo •HCN	Calor	
Yang y Oró, 1971	CO, NH ₃ , H ₂	Calor	
Yuasa y Oró, 1974	HCN, H ₂ O, MgO ó MgCO ₃		
Chadha y col., 1974	CH ₄ , NH ₃	Arco eléctrico	
Robertson y Miller, 1996	Cianoacetaldehído, guanidina	Calor	
Zubay, y Mui, 2001G.	Adenina, azúcares, fosfatos	Calor	
CARBOHIDRATOS			
Oró, 1961	HCN, NH ₃ , H ₂ O	Calor	Se han sintetizado casi todos los azúcares biológicos pero en bajo rendimiento.
Oró y col., 1962	Formaldehído, acetaldehído, Gliceraldehído	Calor	
Steinman y col., 1964	Glucosa, ácido fosfórico, Diciandiamida	UV	
Ponnamperuma, 1966	Formaldehído, HCN, H ₂ O	UV, rayos γ y β	

☞ Continúa...

Tabla I. Ejemplos de síntesis prebióticas (continuación...)*

Autor	Mezcla de reacción	Fuente de energía	Comentarios
Gabel y Ponnamperuma, 1967	Formol, Alúmina, aluminio-silicatos	Calor	
Ponnamperuma, 1966	CH ₄ , H ₂ O, NH ₃	Descarga luminosa	
Oró y col., 1966	Gel de silicio, CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	Calor	
Toupance y col., 1971	CH ₄ , solamente ó CH ₄ , NH ₃ ó CH ₄ , N ₂ ó CH ₄ , H ₂ O ó CH ₄ , H ₂ S, CS ₂	Descarga eléctrica	
Toupance y col., 1977	CH ₄ solamente ó CH ₄ , NH ₃	UV	
Zubay, 1998	Formaldehído, Mg(OH) ₂	Calor	
	ÁCIDOS CARBOXÍLICOS		Ácidos monocarboxílicos hasta de C ₁₀ y ácidos di y tricarboxílicos asociados a procesos metabólicos
Garrison y col., 1951	CO ₂ , H ₂ O	Iones He ²⁺	
Miller, 1953	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ , H ₂ O	Descarga de chispas	
Oró y col., 1959	CH ₄ , NH ₄ OH, H ₂ O	Calor	
Fox y col., 1961	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	Calor	
Allen y col., 1966	CH ₄ , H ₂ O	Descarga luminosa	
Zeitman y col., 1974	CH ₄ , N ₂ , NH ₄ Cl	Descarga eléctrica	
Negrón-Mendoza y Ponnamperuma, 1976	Ácido acético, H ₂ O	Rayos gamma	
Negrón-Mendoza y Ponnamperuma, 1982	Ácido acético, H ₂ O	UV	
Castillo y col., 1985	Ácido málico	Rayos gamma	
Negrón-Mendoza y col., 1985	HCN, CH ₃ CN y CH ₃ OH, CH ₃ CH ₂ CN	Rayos gamma	
Draganic y col., 1985	NH ₂ CN y HCN	Rayos gamma	
	PORFIRINAS		Compuestos del tipo porfirinas
Hodgson y Ponnamperuma, 1968	CH ₄ , NH ₃ , H ₂ O	UV, descarga eléctrica	
	LÍPIDOS		Lípidos y fosfolípidos
Oró y col., 1978	Palmiato de amonio, glicerol. Cianamida, glicerofosfato	Calor	
Rao y col., 1982	Palmiato de amonio, glicerol-fosfato POPCianamida, glicerofosfato	Calor	

*Tomada y modificada de Negrón-Mendoza, 1983.

3.4. Modelos pre-celulares

En forma paralela a la formación de estos polímeros biológicos debió llevarse a cabo la asociación de ellos, formando microsistemas con membrana que encapsularan compuestos simples y agua, y además permitieran el intercambio de materia y energía. Este tipo de modelos representa un cambio de organización de la materia y probablemente antecedió a la formación de sistemas vivos. Entre los modelos precelulares que se han estudiado encontramos: los coacervados de Oparin (1934); las microesferas de protenoides de Fox (Fox y Dose, 1977), y los

sulfobios y colpoides de Herrera (1930). Estos modelos posiblemente no representan a sistemas que hayan antecedido a sistemas vivos, pero son un ejemplo de organización de la materia a partir de estados más sencillos.

4. Comentarios finales

En el año 2003 se cumplieron 50 años de la realización del experimento de Miller, inicio de las síntesis abióticas. En este periodo se ha logrado reunir una cantidad de información sobre diferentes disciplinas que se enlazan y nos dan un panorama más probable

de cómo fue la Tierra primitiva y cómo es el medio interestelar. Todo ello nos ha permitido reproducir en el laboratorio algunos pasos de la evolución química que posiblemente condujeron a la aparición de la vida en la Tierra. ▀

5. Referencias

- Bernal, J.D., *The Physical Basis of Life*, Routledge and Kegan Paul, Londres, 1951.
- Cairns-Smith, A.G. The Origin of life and the nature of the primitive gene, *J. Theor. Biol.* **10**, 53-88, 1966.
- Cairns-Smith, A.G., *Genetic takeover and the mineral origins of life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Ferris, J.P. y Ertem, G. Oligomerization reactions of ribonucleotides on montmorillonite: Reaction of the 5' Phosphorimidazolido of adenosine, *Science*, **257**, 1387-1389, 1992.
- Fox, S. W., Melius, P., y Nakashima, T., N-terminal pyroglutamyl residues in proteins and thermal peptides. En: Matsubo, R, H. Yamanaka, T. (ed.) *Proceedings of the symposium on evolution of proteins molecules*, Scientific Society Press, Japón, 1977.
- Fox y, S. y Dose, *Molecular evolution and the origin of life*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1977.
- Gilbert, W., The ARN world, *Nature*, **319**, 618, 1986.
- Haldane, J.B.S. *Origin of Life, in: On being the right size and other essays*, Oxford University Press, Oxford, 1987, p.101-112.
- Herrera, A.L., A new theory of the origin and nature of life, *Science*, **96**, 2479, 1942.
- Inoue, T. y Orgel. L.E., A non enzymatic RNA polymerase model, *Science*, **219**, 859-862, 1982.
- Lahav, N., *Biogénesis*, Oxford University Press, Londres, 1999.
- Larralde, R. Robertson, M.P. y Miller, S.L., Rates of decomposition of ribose and other sugars: implications for chemical evolution, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **92**, 8158-60, 1995.
- Mosqueira, F.G., On the Origin of Life Event, *Origins of Life and Evol. Biosphere*, **18**, 143-156, 1988.
- Mosqueira, F.G., Ramos-Bernal, S. y Negrón-Mendoza, A., A simple model of the thermal prebiotic oligomerization of amino acids, *BioSystems*, **57**, 67-73, 2000.
- Mosqueira, F.G., Ramos-Bernal, S. y Negrón-Mendoza, A., Biased polymers in the origin of life, *BioSystems* **65**, 99-103, 2002.
- Negrón-Mendoza, A., Tierra primitiva y síntesis abiótica, en *Homenaje a Oparin*, Artis, M., Casanueva, M. y Chávez, N., (eds.), Correspondencia, UAM, México, 1983.
- Negrón-Mendoza, A., Albarrán, G. y Ramos-Bernal, S., Clays as natural catalyst in Prebiotic Processes. En: *Chemical Evolution: Physics of the Origin and Evolution of Life* (Chela-Flores, J. y Raulin, F. eds.), Kluwer Academic Publishers, Holanda, p. 97-106, 1996.
- Negrón-Mendoza, A. and S. Ramos-Bernal, The role of clays in the origin of life. En: *Origins: of life*, Ed. J. Seckbach, Kluwer Academic Publisher, Netherlands, 2004.
- Oparin, A.I. *El origen de la vida*, edición en español, Ediciones ELA, S.A. 1938.
- Perezgasga, L., Silva, E. Lascano, A., y Negrón-Mendoza, A. The sulfocyanic theory on the origin of life: towards a critical reappraisal of autotrophic theory, *J. Astrobiology*, en prensa, 2004.
- Cech, T.R. y Bass, B.L., Biological catalysis by RNA. *Ann. Rev. Biochem.* **55**, 145-147, 1986.
- Shapiro, R., Prebiotic ribose synthesis: a critical analysis, *Orig. Life Evol. Biosph.*, **18**, 71-85, 1988.

6. Lecturas sugeridas

- de Duve, C., *Life evolving. molecules, mind and meaning*, Oxford University Press, New York, 2002.
- Miller, S.L. y Orgel, L., *The origins of Life on Earth*, Prentice Hall, New Jersey, 1974.
- Mason, S.F., *Chemical Evolution*, Clarendon Press, Oxford, 1992.
- Schopf. W., *La cuna de la vida*, Editorial Crítica, Barcelona, 2000.