

17.1 ¿CÓMO EMPEZÓ LA VIDA?

El pensamiento pre-darwiniano sostenía que, hacía unos cuantos miles de años, Dios había creado de forma simultánea a todas las especies conocidas. Además, hasta el siglo XIX la mayoría de la gente creía que los nuevos miembros de las especies surgían todo el tiempo gracias a la **generación espontánea**, tanto de la materia inanimada como de otras formas de vida no relacionadas. En 1609 un botánico francés escribió: “Hay un árbol [...] que se ve frecuentemente en Escocia. De este árbol caen hojas: en un lado chocan contra el agua y luego lentamente se transforman en peces; por el otro lado caen al suelo y se convierten en aves”. En los escritos de la Edad Media abundan observaciones similares. Se creía que los microorganismos brotaban espontáneamente del caldo, que los gusanos aparecían de la carne y que los ratones surgían de la mezcla de camisas sudadas y trigo.

Los experimentos refutaron la generación espontánea

Recordarás que en el capítulo 1 vimos que, en 1668, el médico italiano Francesco Redi rechazó la hipótesis que relacionaba los gusanos con la carne, simplemente al mantener a las moscas (cuyos huevecillos se vuelven larvas) lejos de la carne sin contaminar. A mediados del siglo XIX, Louis Pasteur en Francia y John Tyndall en Inglaterra refutaron la idea del caldo que produce microorganismos (**FIGURA 17-1**). Aunque el trabajo de ambos destruyó de manera definitiva la creencia en la generación espontánea, no resolvió la pregunta de cómo se originó la vida en la Tierra. O bien, como lo expresó el bioquímico Stanley Miller, “Pasteur nunca probó que esto no sucedió una vez, pues sólo demostró que esto no sucede todo el tiempo”.

Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos

Durante casi medio siglo, el tema se mantuvo latente. Con el tiempo, los biólogos volvieron a retomar la pregunta del origen de la vida. En las décadas de 1920 y 1930, Alexander Oparin en Rusia y John B. S. Haldane en Inglaterra observaron que la actual atmósfera rica en oxígeno no habría permitido la formación espontánea de las complejas moléculas orgáni-

cas necesarias para la vida. El oxígeno reacciona de inmediato con otras moléculas rompiendo los enlaces químicos. Así, un ambiente rico en oxígeno tiende a mantener separadas las moléculas.

Oparin y Haldane especularon que la atmósfera de la joven Tierra habría contenido muy poco oxígeno y que, en tales condiciones atmosféricas, las complejas moléculas orgánicas surgieron gracias a reacciones químicas ordinarias. Algunos tipos de moléculas lograron sobrevivir mejor que otras en un ambiente sin vida de la joven Tierra y, por lo tanto, serían más comunes con el paso del tiempo. Esta versión química de la “supervivencia del más apto” se llama evolución *prebiótica* (que significa “antes de la vida”). En las circunstancias consideradas por Oparin y Haldane, la evolución prebiótica química dio origen a moléculas cada vez más complejas y, a la larga, a los organismos vivos.

Las moléculas orgánicas pueden formarse espontáneamente en condiciones prebióticas

Inspirados por las ideas de Oparin y Haldane, en 1951 Stanley Miller y Harold Urey se dieron a la tarea de simular la evolución prebiótica en el laboratorio. Ellos sabían que, basándose en la composición química de las rocas que se formaron al inicio de la historia de la Tierra, los geoquímicos llegaron a la conclusión de que la atmósfera primigenia prácticamente no contenía gas oxígeno; pero que sí contenía otras sustancias, como metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua. Miller y Urey simularon una atmósfera sin oxígeno de la incipiente Tierra al mezclar estos componentes en un matraz. Una descarga eléctrica sustituyó la energía intensa de las tormentas eléctricas que había en aquella Tierra. Con su experimento microcósmico, los investigadores encontraron que aparecían moléculas orgánicas sencillas después de unos cuantos días (**FIGURA 17-2**). Experimentos similares realizados por Miller y otros produjeron aminoácidos, proteínas cortas, nucleótidos, trifosfato de adenosina (ATP) y otras moléculas características de los seres vivos.

En años recientes, nuevas evidencias convencieron a la mayoría de los geoquímicos de que la composición real de la atmósfera terrestre primigenia quizá difería de la mezcla de gases que se usaron en el experimento pionero de Miller y Urey. Esta mejor comprensión de la atmósfera primitiva, sin

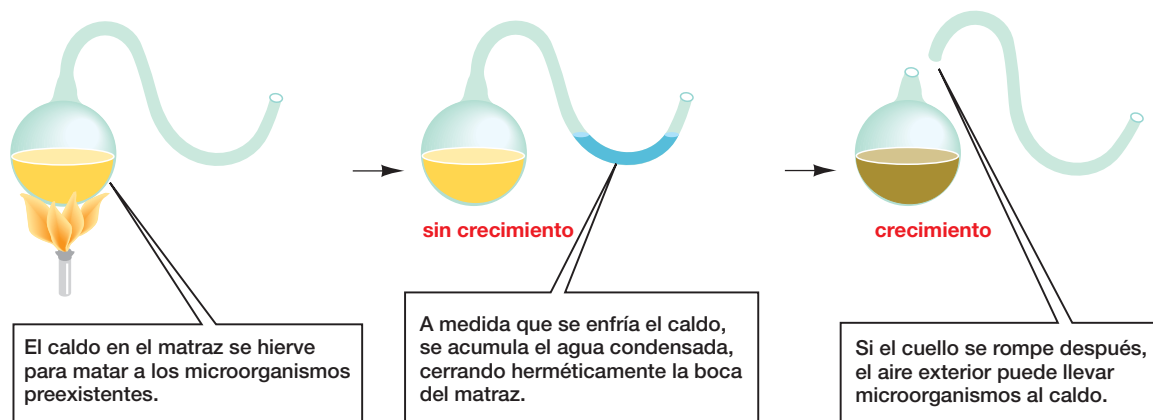


FIGURA 17-1 Refutación de la generación espontánea

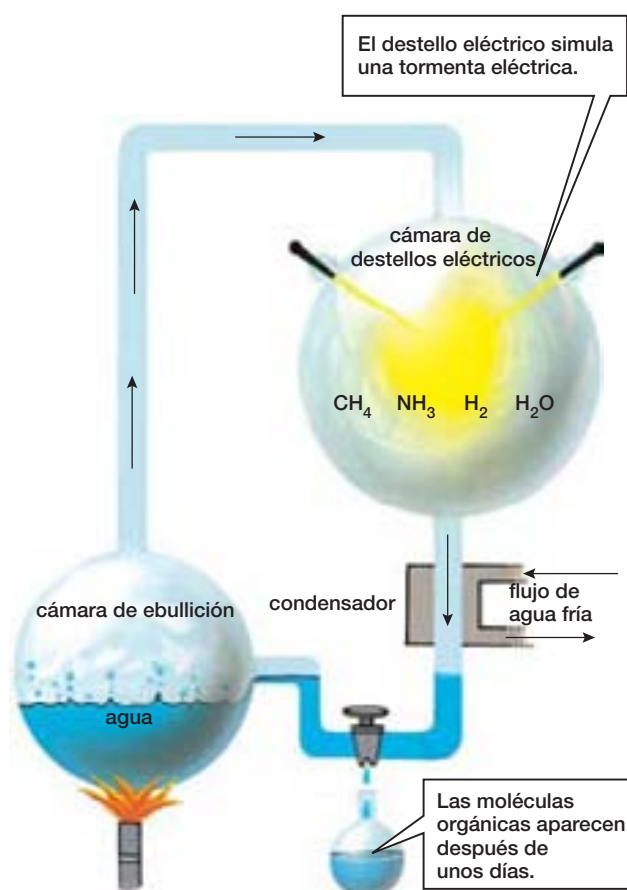


FIGURA 17-2 Aparato del experimento de Stanley Miller y Harold Urey

Como las etapas más remotas de la vida no dejaron fósiles, los historiadores que se ocupan de la evolución desarrollaron una estrategia para reproducir en el laboratorio las condiciones que quizás hayan prevalecido en la Tierra primitiva. La mezcla de gases en la cámara de destellos simula la atmósfera primigenia de la Tierra. **PREGUNTA:** ¿Cómo resultaría este experimento si se agregara oxígeno en la cámara de destellos?

embargo, no ha socavado el descubrimiento fundamental logrado por el experimento de Miller y Urey. Asimismo, otros experimentos con atmósferas simuladas más reales (también sin oxígeno) produjeron moléculas orgánicas. Tales experimentos demostraron que la electricidad no es la única fuente de energía adecuada. Otras fuentes de energía disponibles en la incipiente Tierra, como el calor o la luz ultravioleta (UV), también mostraron que estimulan la formación de moléculas orgánicas en simulaciones experimentales de las condiciones prebióticas. Así, aunque nunca sepamos exactamente cómo era la atmósfera inicial, podemos estar seguros de que las moléculas orgánicas se formaron de manera espontánea en la Tierra primigenia.

Las moléculas orgánicas adicionales probablemente vinieron del espacio cuando los meteoritos y fragmentos de cometas se estrellaron contra la corteza terrestre. Los análisis actuales, realizados a los meteoritos recuperados de los cráteres que formaron al impactarse con la Tierra, revelan que algunos de ellos contienen relativamente altas concentraciones

de aminoácidos y otras moléculas orgánicas sencillas. Los experimentos de laboratorio sugieren que quizá tales moléculas se formaron en el espacio interestelar antes de llegar a la Tierra. Cuando se supo que las moléculas pequeñas están presentes en el espacio, éstas se sometieron a condiciones parecidas a las del espacio, como temperatura y presión muy bajas, y se bombardearon con luz ultravioleta, por lo que se produjeron moléculas orgánicas más grandes.

Las moléculas orgánicas se pueden acumular en condiciones prebióticas

La síntesis prebiótica no era muy eficiente ni muy rápida. No obstante, en unos cuantos cientos de millones de años, grandes cantidades de moléculas orgánicas se acumularon en los océanos de la Tierra primitiva. Actualmente, la mayoría de las moléculas orgánicas tienen una vida breve porque, o bien son digeridas por los organismos vivos o reaccionan con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, como la joven Tierra carecía de vida y de oxígeno, las moléculas no estaban expuestas a dichas amenazas.

Incluso, tal vez las moléculas prebióticas hayan estado amenazadas por la alta energía de la radiación solar ultravioleta, porque la incipiente Tierra carecía de una capa de ozono, la cual es una región elevada de la atmósfera actual que está enriquecida con moléculas de ozono (O_3), que absorben algo de la luz solar ultravioleta antes de que llegue a la superficie terrestre. Antes de que se formara la capa de ozono, el bombardeo UV debió ser intenso. La radiación ultravioleta, como hemos visto, puede brindar energía para la formación de moléculas orgánicas; no obstante, también puede romperlas. Algunos lugares, sin embargo, como los que se encuentran debajo de arrecifes rocosos o aun en el fondo de los mares poco profundos, quizá hayan estado protegidos de la radiación ultravioleta. En tales lugares es posible que se hayan acumulado las moléculas orgánicas.

La arcilla pudo estimular la formación de moléculas orgánicas más grandes

En la siguiente etapa de la evolución prebiótica, las moléculas sencillas se combinaron para formar moléculas más grandes. Las reacciones químicas que formaron las moléculas más grandes necesitaron que las moléculas que reaccionaron se unieran estrechamente. Los científicos proponen varios procesos mediante los cuales las altas concentraciones requeridas pudieron haberse logrado en la Tierra primigenia. Una posibilidad es que las moléculas pequeñas se acumularan en la superficie de partículas de arcilla, las cuales pueden tener una pequeña carga eléctrica que atrae a las moléculas disueltas con la carga opuesta. Agrupadas en una partícula de arcilla, las moléculas pequeñas quizás hayan estado lo suficientemente apretadas como para permitir las reacciones químicas entre sí. Los investigadores han demostrado la verosimilitud de estas circunstancias con experimentos, donde agregan arcilla a soluciones en las cuales se disolvieron pequeñas moléculas biológicas, que estimulan la formación de moléculas más grandes y más complejas. Dichas moléculas pudieron haberse formado sobre la arcilla en el fondo de los océanos o lagos de la Tierra primitiva, y continuaron formando los bloques que constituyeron a los primeros organismos vivos.

El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse

Aunque todos los organismos vivos emplean el DNA para codificar y almacenar información genética, es improbable que el DNA fuera la molécula de información más primitiva. El DNA puede autorreplicarse sólo con la ayuda de enzimas proteínicas grandes y complejas; no obstante, las instrucciones para construir estas enzimas se codifican en el DNA mismo. Por tal razón, el origen del papel que juega el DNA como molécula para almacenamiento de información de la vida plantea el enigma “del huevo o la gallina”. El DNA requiere de proteínas, pero éstas a la vez requieren del DNA. Por ello, es difícil construir un escenario verosímil para el origen del DNA autorreplicante a partir de moléculas prebióticas; por lo tanto, es probable que el sistema actual de almacenamiento de información basado en el DNA haya evolucionado a partir de un sistema anterior.

El principal candidato para la primera molécula de información autorreplicante es el RNA. En la década de 1980, Thomas Cech y Sidney Altman, cuando trabajaban con el organismo unicelular *Tetrahymena*, descubrieron una reacción celular que era catalizada no por una proteína, sino por una molécula de RNA pequeña. Debido a que esta molécula de RNA especial realizaba una función que previamente se creía sólo efectuaban las enzimas proteínicas, Cech y Altman decidieron darle el nombre de **ribozima** a la molécula catalítica de RNA.

En los años posteriores al descubrimiento de tales moléculas, los investigadores encontraron docenas de ribozimas que se presentan de forma natural y que catalizan una variedad de reacciones, incluyendo el corte de otras moléculas de RNA y el empalme de diferentes fragmentos de RNA. Las ribozimas se han encontrado también en la maquinaria de las células que fabrican proteínas, donde ayudan a catalizar la adherencia de moléculas de aminoácidos a las proteínas en crecimiento. Además, los investigadores lograron sintetizar diferentes ribozimas en el laboratorio, como aquellas que catalizan la replicación de moléculas pequeñas de RNA.

El descubrimiento de que las moléculas de RNA actúan como catalizadoras para diversas reacciones, incluida la replicación del RNA, sirve de apoyo a la hipótesis de que la vida surgió en un “mundo de RNA”. De acuerdo con este punto de vista, la era actual de vida basada en el DNA estuvo precedida por otra donde el RNA servía como molécula genética portadora de información, y como enzima catalizadora de su propia duplicación. Este mundo de RNA pudo haber surgido después de cientos de millones de años de síntesis química prebiótica, durante los cuales los nucleótidos de RNA quizás hayan estado entre las moléculas sintetizadas. Después de haber logrado una concentración suficientemente alta, tal vez en partículas de arcilla, los nucleótidos probablemente se enlazaron para formar cadenas cortas de RNA.

Supongamos que, simplemente por azar, una de estas cadenas de RNA era una ribozima que podía catalizar la producción de sus propias copias. Tal vez esta primer ribozima autorreplicante no desempeña bien su trabajo y por ello produjo copias con muchos errores, los cuales se consideraron como las primeras mutaciones. Al igual que las mutaciones modernas, indudablemente la mayoría arruinó las funciones catalizadoras de las “moléculas hijas”; sin embargo, algunas

cuantas pudieron haber mejorado. Estas mejoras establecieron las condiciones para la evolución de las moléculas de RNA, como variación de ribozimas con mayor rapidez y exactitud de duplicación, haciendo más copias de sí mismas y desplazando a las moléculas menos eficientes. La evolución molecular en el mundo del RNA prosiguió hasta que, por alguna serie de eventos todavía desconocidos, el RNA retrocedió gradualmente hasta su papel actual como intermediario entre el DNA y las enzimas proteínicas.

Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas

Las moléculas autorreplicantes solas no constituyen la vida; tales moléculas deben estar encerradas dentro de alguna clase de membrana envolvente. Las precursoras de las primeras membranas biológicas quizá fueron estructuras sencillas, que se formaron de manera espontánea mediante procesos netamente físicos y mecánicos. Por ejemplo, los químicos han demostrado que si se agita el agua que contiene proteínas y lípidos, para simular las olas que rompían en las costas primitivas, las proteínas y los lípidos se combinarían para formar estructuras huecas llamadas *microesferas*, las cuales se asemejan a las células vivas en varios aspectos. Tienen un límite exterior bien definido que separa su contenido interno de su solución externa. Si la composición de la microesfera es correcta, se forma una “membrana” que se asemeja de manera notable a una membrana celular verdadera. En ciertas condiciones, las microesferas absorben material de la solución externa, crecen y se dividen.

Si sucediera que una microesfera rodea la ribozima correcta, se formaría algo parecido a una célula viva. La llamaríamos **protocélula**, cuya forma estructural sería como una célula, pero no como un ser vivo. En la protocélula las ribozimas y otras moléculas encerradas se protegerían de las ribozimas que vagan libremente en el caldo primigenio. Los nucleótidos y otras moléculas pequeñas quizá se hayan difundido a través de la membrana y utilizado para sintetizar nuevas ribozimas y otras moléculas complejas. Después de haber crecido lo suficiente, la microesfera se dividiría y unas cuantas copias de las ribozimas se incorporarían a cada microesfera hija. Si este proceso ocurriera, la trayectoria hacia la evolución de las primeras células estaría casi por terminar.

¿Hubo un momento específico en que la protocélula inanimada haya dado origen a un ser vivo? Probablemente no. Al igual que la mayoría de las transiciones evolutivas, el cambio de la protocélula a una célula viva fue un proceso continuo, sin límites bien definidos entre un estado y el siguiente.

Pero, ¿realmente sucedió todo esto?

Las circunstancias anteriores, aunque verosímiles y sustentadas por múltiples descubrimientos, no son en modo alguno irrefutables. Uno de los aspectos más impresionantes de la investigación sobre el origen de la vida es la gran diversidad de suposiciones, experimentos e hipótesis contradictorias. (La obra de Iris Fry *The Emergence of Life on Earth*, citada en la sección de “Para mayor información”, al final de este capítulo, ofrece una idea de dichas controversias). Los investigadores no están de acuerdo sobre si la vida surgió en aguas estancadas, en el mar, en películas húmedas sobre la superficie de cristales de arcilla o en respiraderos extraordinariamente calientes de los mares profundos. Algunos sostienen

que la vida llegó del espacio a la Tierra. ¿Podemos obtener algunas conclusiones de las investigaciones realizadas hasta ahora? Nadie lo sabe con seguridad, pero haremos algunas observaciones.

Primera, los experimentos de Miller y otros demuestran que los aminoácidos, los nucleótidos y otras moléculas orgánicas, junto con las estructuras sencillas tipo membrana, se pudieron haber formado de manera abundante en la Tierra primitiva. Segunda, la evolución química tuvo largos periodos y disposición de inmensas áreas terrestres. Con el tiempo suficiente y un acervo grande de moléculas reactivas, muchas veces incluso los sucesos extremadamente raros ocurren. De modo que aunque una evolución prebiótica haya generado sólo moléculas sencillas, los catalizadores primitivos no eran muy eficientes y las primeras membranas eran también muy simples, las vastas magnitudes de tiempo y de espacio disponibles habrían aumentado la probabilidad de dar pasos pequeños en la trayectoria del caldo primigenio a la célula viva.

La mayoría de los biólogos aceptan que el origen de la vida fue probablemente una consecuencia inevitable de la acción de las leyes naturales. Debemos hacer énfasis, sin embargo, en que esta propuesta no puede comprobarse de manera definitiva. El origen de la vida no dejó ningún registro, y los investigadores que exploran este misterio proceden sólo desarrollando un escenario hipotético y luego realizando investigaciones en el laboratorio, para determinar si los pasos dados son química y biológicamente posibles.

17.2 ¿CÓMO ERAN LOS PRIMEROS ORGANISMOS?

Cuando se formó la Tierra, hace unos 4500 millones de años, estaba sumamente caliente (FIGURA 17-3). Una multitud de meteoritos chocaron contra nuestro planeta en formación y la energía cinética de esas rocas extraterrestres se convirtió en calor por el impacto; se liberó aún más calor por el decaimiento de los átomos radiactivos. La roca que formaba la Tierra se fundió y los elementos más pesados, como el hierro y el ní-

quel, se hundieron hacia el centro del planeta, donde permanecen fundidos en la actualidad. Debió haber tomado cientos de millones de años para que la Tierra se enfriara lo suficiente como para permitir la existencia de agua en su estado líquido. No obstante, parece que la vida surgió justamente poco tiempo después de que había disponible agua en estado líquido.

Los organismos fósiles más antiguos que se han encontrado hasta ahora están incrustados en rocas que tienen aproximadamente 3500 millones de años de antigüedad. (Ésta se determinó empleando la técnica de fechado radiométrico; véase “Investigación científica: ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?”). Los rastros químicos de las rocas más antiguas sugieren a algunos paleontólogos que la vida es aún más arcaica: quizá tan antigua como unos 3900 millones de años.

El periodo en que comenzó la vida se conoce como la era precámbrica, cuyo nombre fue dado por geólogos y paleontólogos, quienes desarrollaron un sistema para asignar nombres por jerarquía a eras, periodos y épocas, para delinear la inmensa magnitud del tiempo geológico (tabla 17-1).

Los primeros organismos fueron procariontes anaerobios

Las primeras células que surgieron en los océanos de la Tierra fueron los **procariontes**, cuyo material genético no estaba contenido dentro de un núcleo separado del resto de la célula. Estas células probablemente obtenían nutrientes y energía al absorber moléculas orgánicas de su ambiente. Como no había gas oxígeno en la atmósfera, las células debieron metabolizar las moléculas orgánicas de forma anaeróbica. Recuerda del capítulo 8 que el metabolismo anaeróbico produce sólo pequeñas cantidades de energía.







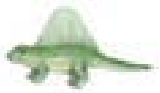





Así, las primeras células eran bacterias anaeróbicas primitivas. A medida que se fueron multiplicando esas bacterias, con el tiempo debieron acabar con las moléculas orgánicas producidas por reacciones químicas prebióticas. Las moléculas más sencillas, como las del dióxido de carbono, y agua, que debieron de abundar mucho, como también la energía en forma de luz solar. Entonces, lo que hacía falta no eran los materiales ni la energía misma, sino las moléculas energéticas, es



FIGURA 17-3 Tierra primitiva

La vida se inició en un planeta caracterizado por abundante actividad volcánica, frecuentes tormentas eléctricas, impactos constantes de meteoritos y una atmósfera carente de gas oxígeno.

Tabla 17-1 Historia de la vida en la Tierra

Era	Periodo	Época	Hace millones de años*	Sucesos principales	
Cenozoica	Cuaternario	Reciente	0.01–presente	Evolución del género <i>Homo</i> ; glaciaciones frecuentes en el Hemisferio Norte; extinción de muchos mamíferos gigantes.	
		Pleistoceno	1.8–0.01		
	Terciario	Plioceno	5–1.8	Prosperidad generalizada de aves, mamíferos, insectos y plantas con flores; desplazamiento de continentes a sus posiciones actuales; clima benigno al inicio del periodo, con extensa formación de montañas y enfriamiento al final.	
		Mioceno	23–5		
		Oligoceno	38–23		
		Eoceno	54–38		
Paleoceno	65–54				
Mesozoica	Cretácico		146–65	Surgen las plantas con flores y llegan a ser dominantes; extinciones masivas de vida marina y alguna terrestre, incluidos los últimos dinosaurios; los continentes modernos quedan bien separados.	
	Jurásico		208–146	Predominio de dinosaurios y coníferas; primeras aves; los continentes se separan parcialmente.	
	Triásico		245-208	Primeros mamíferos y dinosaurios; los bosques de gimnospermas y helechos arbóreos; inicio de la separación de la Pangea.	
Paleozoica	Pérmico		286–245	Extinciones marinas masivas, incluidos los últimos trilobites; auge de los reptiles y decadencia de los anfibios; unión de continentes en una sola masa de tierra, la Pangea.	
	Carbonífero		360–286	Bosques pantanosos de helechos arbóreos y licopodios; primeras coníferas; predominio de los anfibios; numerosos insectos, primeros reptiles.	
	Devónico		410–360	Los peces y trilobites prosperan en el mar; primeros anfibios e insectos; primeras semillas y polen.	
	Silúrico		440–410	Muchos peces, trilobites y moluscos en el mar; primeras plantas vasculares; las plantas y los artrópodos invaden la tierra.	
	Ordovícico		505–440	Los invertebrados, especialmente los artrópodos y los moluscos, dominan los mares; primeros hongos.	
		Cámbrico		544–505	Prosperan las algas marinas primitivas; origen de la mayoría de los tipos de invertebrados marinos; primeros peces.
Precámbrica			Aprox. 1000	Primeros animales (invertebrados marinos de cuerpo blando).	
			1200	Primeros organismos multicelulares.	
			2000	Primeros eucariotas.	
			2200	Acumulación de oxígeno libre en la atmósfera.	
			3500	Origen de la fotosíntesis (en cianobacterias).	
			3900–3500	Primeras células vivientes (procariotas).	
			4000–3900	Aparición de las primeras rocas en la Tierra.	
		4600	Origen del sistema solar y de la Tierra.		

decir, las moléculas donde la energía se almacenara en enlaces químicos.

Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar

Con paso del tiempo, algunas células adquirieron la capacidad para emplear la energía de la luz solar, para impulsar la síntesis de moléculas complejas de alta energía a partir de moléculas más sencillas; en otras palabras, surgió la fotosíntesis, la cual requiere de una fuente de hidrógeno; las bacterias fotosintéticas más primitivas probablemente utilizaron sulfuro de hidrógeno disuelto en agua para ese propósito (como lo hacen actualmente las bacterias fotosintéticas púrpuras). A final de cuentas, sin embargo, tuvo que disminuir el abastecimiento terrestre de sulfuro de hidrógeno (que se produce principalmente por los volcanes). La escasez de sulfuro de hidrógeno preparó el escenario para la evolución de las bacterias fotosintéticas que fueron capaces de usar la fuente de hidrógeno más abundante del planeta: el agua (H_2O).

La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera

La fotosíntesis basada en el agua convierte a ésta y al dióxido de carbono en moléculas energéticas de azúcar, liberando así el oxígeno como subproducto. La aparición de este nuevo método para captar energía introdujo, por primera vez, cantidades importantes de oxígeno libre en la atmósfera. Al principio el nuevo oxígeno liberado se consumió rápidamente por las reacciones con otras moléculas en la atmósfera y la corteza terrestre (o capa superficial). Un átomo reactivo especialmente común en la corteza era el hierro y mucho del nuevo oxígeno se combinó con los átomos de hierro para formar enormes depósitos de óxido de hierro (conocido también como herrumbre).

Después de que todo el hierro accesible se convirtió en herrumbre, empezó a incrementarse la concentración de gas oxígeno en la atmósfera. El análisis químico de las rocas sugiere que cantidades significativas de oxígeno aparecieron primero en la atmósfera, hace aproximadamente 2200 millones de años, producidas por las bacterias que probablemente eran muy similares a las cianobacterias modernas. (Indudablemente en la actualidad respiras algunas moléculas de oxígeno que fueron expelidas hace unos 2000 millones de años por alguna de esas cianobacterias primitivas). Los niveles de oxígeno atmosférico se incrementaron paulatinamente hasta que alcanzaron un nivel estable hace cerca de 1500 millones de años. Desde ese tiempo, la proporción de oxígeno en la atmósfera ha sido casi constante, ya que la cantidad de oxígeno liberado por la fotosíntesis en todo el mundo se compensa exactamente con la cantidad que se consume en la respiración aeróbica.

El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno

El oxígeno es potencialmente muy peligroso para los seres vivos, ya que reacciona con las moléculas orgánicas y las destruye. Muchas de las bacterias anaeróbicas actuales mueren cuando se exponen al oxígeno, el cual resulta un veneno mortal para ellas. La acumulación de oxígeno en la atmósfera de la Tierra primitiva probablemente exterminó a muchos organismos y fomentó la evolución de los mecanismos celulares para contrarrestar la toxicidad del oxígeno. Esta crisis de la evolución de la vida también creó la presión ambiental para

el siguiente gran adelanto en la era de los microbios: la capacidad para utilizar el oxígeno en el metabolismo, la cual no solamente brinda una defensa contra la acción química del oxígeno, sino que realmente canaliza el poder destructor del oxígeno a través de la respiración aeróbica, para generar energía útil para la célula. Debido a que la cantidad de energía disponible para la célula se incrementa considerablemente cuando el oxígeno se usa para metabolizar las moléculas de los alimentos, las células aeróbicas tenían una importante ventaja selectiva.

Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas

Multitudes de bacterias ofrecerían una fuente rica de alimento para cualquier organismo que pudiera comérselas. No hay fósiles de las primeras células depredadoras que hayan recorrido los océanos; no obstante, los paleobiólogos especulan que si alguna vez apareció una adecuada población de presas (como estas bacterias), la depredación pudo haber evolucionado rápidamente. De acuerdo con la hipótesis de mayor aceptación, estos depredadores primitivos eran procariotas que evolucionaron hasta llegar a ser más grandes que las bacterias comunes. Además, habían perdido la rígida pared celular que rodea a la mayor parte de las células bacterianas, de modo que su membrana plasmática flexible estaba en contacto con el ambiente. Así, las células depredadoras eran capaces de envolver a las bacterias más pequeñas en una bolsa de membrana plegable y, de esa forma, se tragaban a toda la bacteria a modo de presa.

Estas depredadoras primitivas tal vez no eran capaces de realizar la fotosíntesis ni el metabolismo aeróbico. Aunque podían captar partículas de alimento grandes, es decir, bacterias, las metabolizaban de manera poco eficiente. Aproximadamente hace 1700 millones de años, un depredador probablemente dio origen a la primera célula eucariótica.

Las membranas internas de las eucariotas pudieron haber surgido a través del plegado hacia dentro de la membrana plasmática

Como sabes, las células eucarióticas difieren de las células procarióticas en que tienen un sistema complicado de membranas internas, incluyendo el núcleo que contiene su material genético. Quizás estas membranas internas hayan surgido originalmente a través del plegado hacia dentro de la membrana celular de un depredador unicelular. Si como sucede con la mayoría de las bacterias actuales, el DNA de los ancestros de las eucariotas estaba adherido al interior de su membrana celular, un pliegue de la membrana cerca del sitio de adherencia del DNA se estranguló y se convirtió en el precursor del núcleo celular.

Además del núcleo, otras estructuras eucarióticas fundamentales incluyen los organelos empleados para el metabolismo energético: las mitocondrias y (en plantas y algas) los cloroplastos. ¿Cómo evolucionaron estos organelos?

Las mitocondrias y los cloroplastos pudieron haber surgido a partir de las bacterias englobadas (fagocitadas)

La hipótesis endosimbiótica propone que las células eucarióticas primitivas adquirieron los precursores de las mitocondrias y los cloroplastos al fagocitar a ciertos tipos de bacterias.

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?

Los primeros geólogos podían fechar las capas de roca y los fósiles que había en ellas sólo de un modo *relativo*: los fósiles encontrados en las capas más profundas de la roca por lo común eran más antiguos que los hallados en las capas más superficiales. Con el descubrimiento de la radiactividad se hizo posible determinar las fechas *absolutas*, dentro de ciertos límites de incertidumbre. Los núcleos de los elementos radiactivos se descomponen o se desintegran espontáneamente y originan otros elementos. Por ejemplo, el carbono 14 (que generalmente se escribe como ^{14}C) se descompone al emitir un electrón para transformarse en nitrógeno 14 (^{14}N). Cada elemento radiactivo se desintegra con una rapidez que es independiente de la temperatura, de la presión o del compuesto químico del cual forma parte. El tiempo necesario para que decaigan la mitad de los núcleos del elemento radiactivo a esa rapidez característica se llama *vida media*, la cual, por ejemplo, en el caso del ^{14}C es de 5730 años.

¿Cómo se utilizan los elementos radiactivos para determinar la edad de las rocas? Si conocemos la rapidez de desintegración y medimos la proporción de los núcleos desintegrados respecto a los núcleos no desintegrados, calcularemos el tiempo transcurrido desde que esos elementos radiactivos quedaron atrapados en la roca. Este procedimiento se llama *fechado radiométrico*. Una técnica de fechado particularmente sencilla mide la desintegración del potasio 40 (^{40}K), cuya vida promedio es de cerca de 1250 millones de años, y que se transforma en argón 40 (^{40}Ar). El potasio es un elemento muy reactivo que comúnmente se encuentra en las rocas volcánicas, como el granito y el basalto; sin embargo, el argón es un gas que no reacciona. Supongamos que un volcán hace erupción y lanza un gran flujo de lava que cubre el terreno contiguo. Como el ^{40}Ar es un gas, se desprende de la lava derretida, de manera que cuando se va enfriando y se solidifica, la roca que se forma ya no contendrá gas ^{40}Ar . Mientras tanto, cualquier ^{40}K presente en la lava endurecida se desintegrará a ^{40}Ar , con la mitad del ^{40}K desintegrándose cada 1250 millones de años. Este gas ^{40}Ar queda atrapado en la roca. El geólogo puede tomar una muestra de roca y determinar la proporción de ^{40}K y de ^{40}Ar (FIGURA E17-1). Si el análisis indica que hay cantidades iguales de

esos dos elementos, el geólogo concluirá que la lava se solidificó hace 1250 millones de años. Si se hace esto con mucho cuidado, tales cálculos son bastante confiables, y si se encuentra un fósil debajo de la lava fechada, digamos en 500 millones de años, entonces sabremos que el fósil tiene al menos esa antigüedad.

Conforme se descomponen algunos elementos radiactivos, éstos pueden darnos un estimado de la edad del sistema solar. El análisis del uranio, el cual se desintegra a plomo, ha demostrado que los meteoritos más antiguos y las rocas lunares recabadas por los astronautas tienen aproximadamente 4600 millones de años.

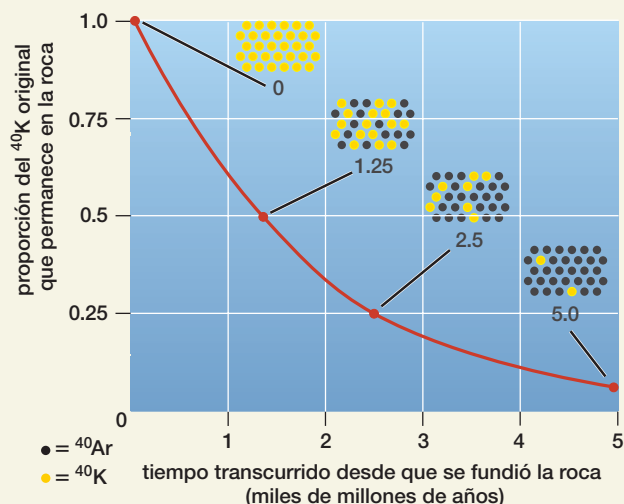


FIGURA E17-1 Relación entre el tiempo y la desintegración del ^{40}K radiactivo a ^{40}Ar

EJERCICIO El uranio 235 decae a plomo 207 con una vida media de 713 millones de años. Si analizas una roca y encuentras que contiene uranio 235 y plomo 207 en una proporción de 3:1, ¿qué tan antigua es la roca?

Estas células y las bacterias atrapadas en ellas (*endo* significa “dentro”) entraron gradualmente en una relación *simbiótica*, es decir, una asociación estrecha entre diferente tipos de organismos durante un tiempo prolongado. ¿Cómo pudo suceder esto?

Supongamos que una célula depredadora anaerobia atrapó a una bacteria aerobia para alimentarse, como lo hace a menudo; pero por alguna razón no la pudo digerir. La bacteria aerobia permaneció viva y en buen estado. De hecho, está mejor que nunca porque el citoplasma de su depredadora-huésped estaba atiborrado de moléculas de alimento a medio digerir: los residuos del metabolismo anaeróbico. La bacteria aerobia absorbió estas moléculas y usó el oxígeno para metabolizarlas, por lo tanto, obtuvo enormes cantidades de energía. Tan abundantes fueron los recursos alimentarios del microorganismo aerobio, y tan copiosa la producción de energía, que probablemente el aerobio tuvo fugas de energía, quizá como ATP o moléculas similares, hacia el citoplasma de su

huésped. La célula depredadora anaerobia, junto con su bacteria simbiótica, puede metabolizar ahora el alimento en forma aeróbica, obteniendo así una gran ventaja sobre otras células anaerobias, y deja un gran número de descendientes. Con el paso del tiempo, las bacterias endosimbióticas pierden su capacidad para vivir de manera independiente de su huésped, y entonces nace la mitocondria (FIGURA 17-4, ① y ②).

Una de estas nuevas asociaciones celulares exitosas debió haber logrado una segunda proeza: atrapar a una cianobacteria fotosintética pero, de manera similar, sin digerir a su presa. La cianobacteria floreció en su nuevo huésped y evolucionó gradualmente hacia el primer cloroplasto (FIGURA 17-4, ③ y ④). Quizás otros organelos eucarióticos se hayan originado también por endosimbiosis. Muchos biólogos creen que cilios, flagelos, centriolos y microtúbulos pudieron haber evolucionado por la simbiosis entre una bacteria del tipo espirilo (que se asemeja a un sacacorchos largo) y una célula eucariótica primitiva.

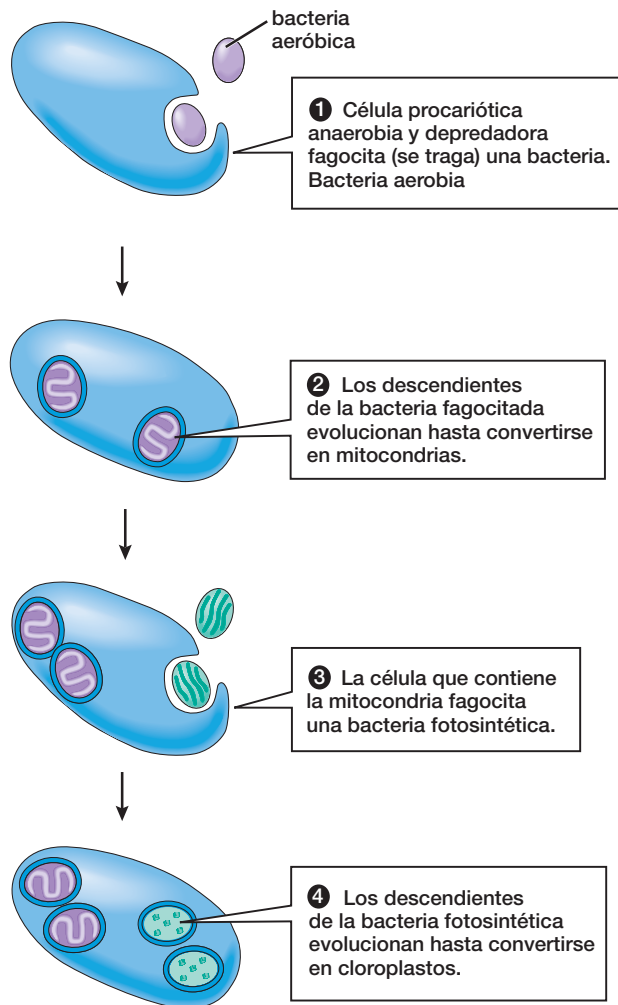


FIGURA 17-4 Origen probable de mitocondrias y cloroplastos en células eucarióticas

PREGUNTA: Los científicos han identificado una bacteria viva que se creía era descendiente del endosimbionte que dio origen a las mitocondrias. ¿Esperarías que la secuencia de DNA de esta bacteria moderna fuera muy parecida a la secuencia de DNA de un cloroplasto vegetal, del núcleo de una célula animal o de la mitocondria de una planta?

Es fuerte la evidencia de la hipótesis endosimbiótica

Varios tipos de evidencias apoyan la hipótesis endosimbiótica. Algunas muy precisas y específicas son las múltiples características bioquímicas distintivas que comparten los organelos eucarióticos y las bacterias vivas. Además, las mitocondrias, los cloroplastos y los centriolos contienen cada uno su propia dotación diminuta de DNA, que muchos investigadores consideran como un residuo del DNA que contenía originalmente la bacteria fagocitada.

Otro tipo de apoyo proviene de los *intermediarios vivientes*, es decir, de organismos que están vivos actualmente y que son parecidos a los ancestros hipotéticos, y que ayudan a demostrar que es factible una vía evolutiva propuesta. Por ejemplo, la ameba *Pelomyxa palustris* carece de mitocondrias, pero aloja a una población permanente de bacterias aerobias que desempeñan una función muy similar. De igual manera, una variedad de corales, algunas almejas, unos pocos caracoles y al



FIGURA 17-5 Simbiosis intracelular moderna

Los antepasados de los cloroplastos de las células vegetales modernas tal vez fueron semejantes a la *Chlorella*, el alga verde unicelular fotosintética que vive en simbiosis dentro del citoplasma del *Paramecium* que se muestra aquí.

menos una especie del *Paramecium* albergan una colección permanente de algas fotosintéticas en sus células (**FIGURA 17-5**). Estos ejemplos de células modernas que alojan a bacterias endosimbiontas sugieren que no tenemos razón alguna para dudar de que asociaciones simbióticas similares pudieron haber ocurrido hace casi 2000 millones de años y que originaron las primeras células eucarióticas.

17.3 ¿CÓMO ERAN LOS PRIMEROS ORGANISMOS MULTICELULARES?

Una vez que evolucionó la depredación, el hecho de tener mayor tamaño se convirtió en una ventaja. En los ambientes marinos a donde se restringía la vida, una célula más grande podía con facilidad fagocitar a una pequeña, y también era más difícil que otras células depredadoras las ingirieran. Por lo general, los organismos grandes se mueven más rápido que los pequeños, y tienen más éxito tanto en la depredación como en la huida. No obstante, las enormes células individuales tienen problemas. El oxígeno y los nutrientes que entran en la célula, así como los productos residuales que salen, deben difundirse a través de la membrana plasmática. Cuanto más grande sea una célula, habrá menos disponibilidad de la membrana superficial por unidad de volumen de citoplasma.

Hay únicamente dos formas en que sobrevive un organismo mayor de un milímetro de diámetro. Primera, puede tener una rapidez metabólica baja, de manera que no necesite mucho oxígeno ni que produzca mucho dióxido de carbono. La estrategia parece que funciona para ciertas algas unicelulares muy grandes. Por otro lado, un organismo puede ser multicelular, es decir, estar compuesto de muchas células pequeñas empaquetadas en un cuerpo unificado más grande.

Algunas algas se volvieron multicelulares

Los fósiles más antiguos de organismos multicelulares datan de hace cerca de 1200 millones de años e incluyen huellas de las primeras algas multicelulares, las cuales surgieron de las células eucarióticas unicelulares que contenían cloroplastos. Los organismos multicelulares proporcionaron, cuando menos, dos ventajas a estas algas marinas. En primer lugar, los depredadores unicelulares tendrían dificultades para fagocitar las algas grandes multicelulares. Y en segundo lugar, la especialización celular habría brindado el potencial necesario para establecerse en un solo sitio, en las aguas brillantemente iluminadas del litoral, mediante estructuras en forma de raíces que se hundían en la arena o se afianzaban a las rocas; en tanto que las estructuras en forma de hojas flotaban más arriba expuestas a la luz solar. Las algas verdes, cafés y rojas que recubren nuestras costas actuales —algunas, como las algas pardas o cafés, de más de 66 metros de longitud—, son descendientes de esas algas multicelulares primitivas.

La diversidad animal surgió en la era precámbrica

Además de las algas fósiles, las rocas de mil millones de años de antigüedad han producido vestigios fósiles a partir de huellas de animales y madrigueras. Esto evidencia la vida animal primitiva; sin embargo, los fósiles de cuerpos de animales aparecieron primero en las rocas del precámbrico de hace entre 610 y 544 millones de años. Algunos de estos antiguos invertebrados (animales que carecen de espina dorsal) son bastante diferentes en apariencia de cualesquiera otros animales que aparecen en capas posteriores de fósiles, y pueden representar los tipos de animales que no tuvieron descendientes. Otros fósiles en estas capas rocosas, sin embargo, parecen ser los ancestros de los animales actuales. Las esponjas primitivas y las medusas aparecen en las capas más antiguas, seguidas posteriormente por los ancestros de gusanos, moluscos y artrópodos.

La gama completa de los animales invertebrados modernos, sin embargo, no aparece en el registro de fósiles, sino hasta el periodo cámbrico, marcando así el comienzo de la era paleozoica, hace alrededor de 544 millones de años. (La frase de “registro de fósiles” es una referencia breve de la colección completa de todas las evidencias de fósiles que se han encontrado hasta ahora). Estos fósiles del cámbrico revelan una radiación adaptativa (véase el capítulo 16) que ya había producido un arreglo diverso de complejos planes corporales. Casi todos los principales grupos de animales que habitan la Tierra actualmente ya estaban presentes en el cámbrico temprano. El surgimiento repentino de tantos tipos diferentes de animales indica que la historia evolutiva inicial, que produjo tan impresionante gama de formas animales diferentes, no se conserva en el registro de fósiles.

Parcialmente la diversificación temprana de los animales probablemente estuvo impulsada por la aparición de estilos de vida de los depredadores. La coevolución del depredador y la presa llevó a la evolución de nuevas características en muchas clases de animales. Por el periodo silúrico (hace 440 a 410 millones de años), los trilobites de coraza que se deslizaban sobre el cieno eran la presa de los amonites y del nautilo septado, los cuales aún sobreviven en una forma que casi no ha sufrido ningún cambio en las aguas profundas del Océano Pacífico ().

Muchos animales de la era paleozoica eran más móviles que sus predecesores evolutivos. Los depredadores tienen una ventaja porque son capaces de desplazarse en espacios amplios en busca de presas adecuadas; mientras que la capacidad de huir con rapidez es una ventaja de la presa. La evolución de la locomoción eficiente en ocasiones estaba asociada con la evolución de una mayor capacidad sensitiva y sistemas nerviosos más complejos. Los sentidos para percibir el tacto, las sustancias químicas y la luz se desarrollaron bastante, junto con un sistema nervioso capaz de manejar la información sensorial y dirigir las conductas apropiadas.

Hace unos 530 millones de años, un grupo de animales —los peces— desarrollaron una nueva forma para sostener el cuerpo: un esqueleto interior. Estos peces primitivos pasaban inadvertidos en la comunidad oceánica; pero hace unos 400 millones de años, los peces ya formaban un grupo diverso y prominente. En general, los peces probaron ser más veloces que los invertebrados, con sentidos más agudos y cerebros más grandes. Con el paso del tiempo se convirtieron en los depredadores dominantes en el mar abierto.

17.4 ¿CÓMO LLEGÓ LA VIDA A LA TIERRA FIRME?

Una de las tramas secundarias más emocionantes del largo recuento de la historia de la vida es la invasión de la tierra por la vida, después de más de 3000 millones de años de una existencia estrictamente acuática. Al pasar a la tierra firme, los organismos tuvieron que vencer muchos obstáculos. Gracias a la flotación, la vida en el mar brinda apoyo contra la gravedad; no obstante, en tierra un organismo debe soportar su peso contra la aplastante fuerza de la gravedad. El mar ofrece un acceso inmediato al agua dadora de vida; pero un organismo terrestre debe encontrar el agua apropiada. Las plantas y los animales que habitan en el mar se reproducen mediante espermatozoides u óvulos móviles, o ambos, los cuales nadan unos hacia otros; sin embargo, quienes habitan en tierra firme tienen que proteger sus gametos de la resequedad.

A pesar de los obstáculos para la vida en la tierra, los inmensos espacios vacíos de la masa terrestre paleozoica representaban una enorme oportunidad evolutiva. Las ventajas potenciales de la vida terrestre eran especialmente grandes para las plantas. El agua absorbe la luz en gran medida, por lo que incluso en las aguas transparentes la fotosíntesis se limita a unos cuantos cientos de metros por debajo de la superficie, y habitualmente a profundidades mucho menores. Afuera del agua, el Sol brilla en todo su esplendor y permite una rápida fotosíntesis. Además, los suelos terrestres son ricos en depósitos de nutrientes; en tanto que el agua de mar suele ser pobre en algunos de éstos, en particular en nitrógeno y fósforo. Finalmente, en el mar paleozoico abundaban los animales herbívoros; en cambio, la tierra firme carecía de vida animal. Las primeras plantas que colonizaron la Tierra dispondrían de abundante luz solar y de fuentes de nutrientes intactas, y estarían a salvo de los depredadores.

Algunas plantas se adaptaron a la vida en tierra firme

En los suelos húmedos situados a la orilla del agua comenzaron a crecer unas cuantas algas verdes pequeñas que aprovechaban la luz solar y los nutrientes. No tenían cuerpos