

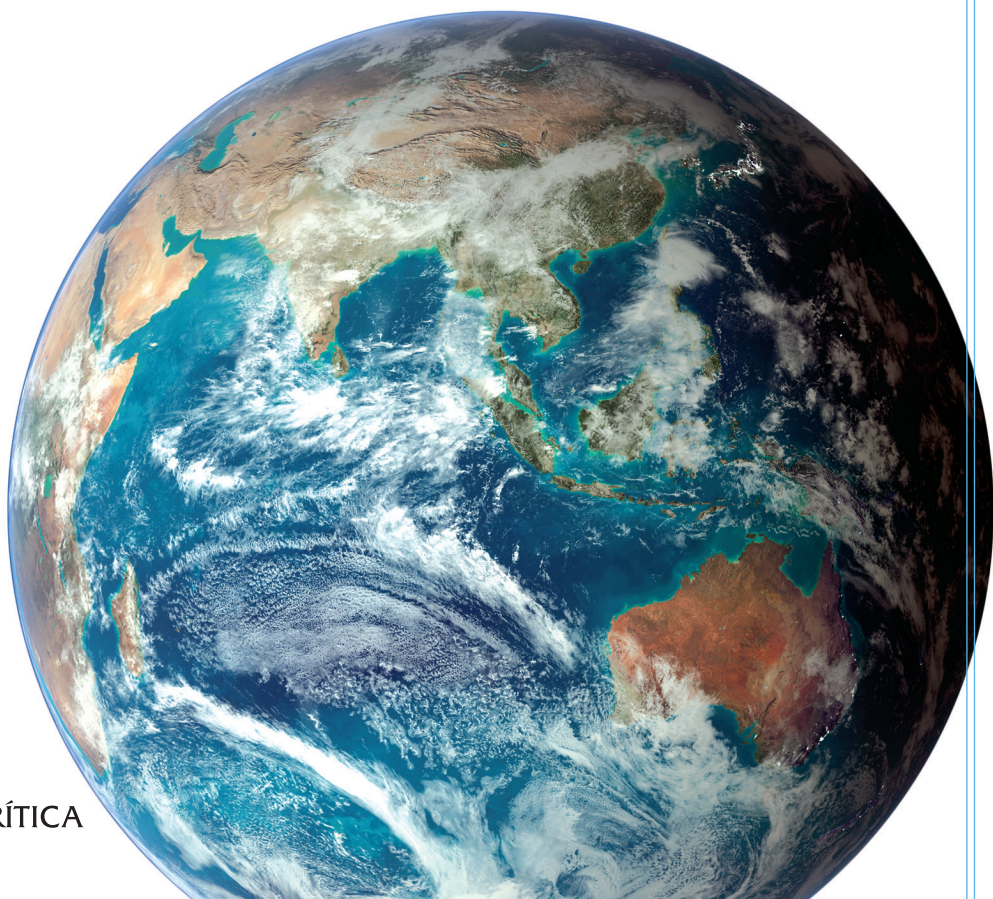
DRAKONTOS

Donald E. Canfield

DK

OXÍGENO

Una historia de cuatro mil millones de años



CRÍTICA

OXÍGENO

Una historia de cuatro mil millones de años

Donald E. Canfield

Traducción castellana de
Javier Sampedro

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: marzo de 2015

Oxígeno. Una historia de cuatro mil millones de años
Donald E. Canfield

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

Título original: *Oxygen. A Four Billion Year History*

© Princeton University Press, 2014
© de la traducción, Javier Sampedro, 2015

© Editorial Planeta S. A., 2015
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es
www.espacioculturalyacademico.com

ISBN: 978-84-9892-815-0
Depósito legal: B. 2488 - 2015
2015. Impreso y encuadernado en España por Huertas Industrias Gráficas S. A.

¿De qué trata el planeta Tierra?

Voy sentado en el tren, como suelo hacer, viajando entre Odense y Copenhague. Acabamos de arrancar desde la parada de Ringsted. Miro por la ventana. La escena es típica del campo danés, mezcla de granjas y bosques. Hay vacas pastando perezosas en el prado, y más allá un granjero está cortando heno. Muy por encima, un halcón busca ratones en la hierba sin podar. Amo este paisaje. Me recuerda a los campos de Ohio donde crecí. No es espectacular, pero reconfortante y tranquilizador a su manera; un paisaje honrado poco propicio a la fanfarronada y el engaño. Entorno los ojos y el paisaje se funde en una masa verde, las vacas se vuelven fantasmas en la distancia. Los reabro y veo que pasamos junto a un área de bosque denso (o al menos lo que pasa por bosque en Dinamarca). Mi mente vaga y reflexiono sobre lo que veo. Dinamarca es un país pequeño y la tierra, incluido el bosque, está gestionada a fondo, de manera que la diversidad de la vida no es particularmente grande. Uno puede viajar a los bosques pluviales de Costa Rica o Brasil y sobrecogerse mucho más con los pájaros tropicales, las ranas, los insectos y la vegetación abundante. Aun así, incluso en Dinamarca, el paisaje es de un verde brillante y rebosante de vida. De hecho, la mires como la mires, la Tierra se caracteriza por la vida diversa y abundante. La cuestión que me preocupa ahora es: ¿por qué?

Se podría insinuar que toda la vida que vemos es simplemente la consecuencia de una larga historia de evolución biológica en la Tierra. En su maravilloso libro *La vida en un planeta joven*, mi colega y buen

amigo Andy Knoll, de la Universidad de Harvard, documenta la cambiante cara de la vida durante los primeros 4.000 millones de años de historia de la Tierra. Muestra cómo una variedad de innovaciones biológicas, como la invención de la fotosíntesis productora de oxígeno, por ejemplo, dieron forma fundamental a la historia de la vida. Después de que los organismos productores de oxígeno evolucionaran por vez primera, otros organismos que utilizan oxígeno les siguieron, y después prosperaron, se multiplicaron y evolucionaron hacia nuevas formas vivas también utilizadoras de oxígeno. Con el tiempo esto condujo a los animales, los organismos más complejos biológicamente de todos los que pueblan la Tierra. Sin oxígeno no habría animales. De manera que, claramente, las innovaciones durante la evolución biológica han dado forma, incluso definido, la biosfera. Pero ¿explica la evolución por sí sola la prodigalidad de la vida en nuestro planeta?

Para considerar esta cuestión, comparemos brevemente la Tierra con Marte. Los científicos todavía consideran posible que exista vida en Marte: al fin y al cabo, Marte tiene la misma edad que la Tierra y hay indicios de la presencia al menos ocasional de agua superficial y subterránea en el planeta. Mientras escribo esto, el rover *Curiosity* de la NASA está sondeando la superficie de Marte en busca de indicios de agua, y de pistas sobre cómo el agua interactúa con el entorno superficial del planeta. Como discutiremos con mayor detalle más abajo, y tal como sostiene la doctrina, donde hay agua puede haber vida. Y, sin embargo, si hay vida en Marte, no salta arriba y abajo como los Whos en Whoville gritando «¡estamos aquí, estamos aquí, estamos aquí!». En contraste, si unos exploradores intergalácticos sondearan la Tierra como nosotros hacemos ahora con Marte, resultaría imposible que la abundante vida de la Tierra les pasara inadvertida. La cuestión es, simplemente, ¿por qué hay tanta vida en la Tierra?

Para responder esto abandonaremos de momento las consideraciones evolutivas y empezaremos por una pregunta más fundamental: ¿cuáles son los ingredientes básicos que necesita la vida, o al menos la vida tal y como la conocemos? Mientras digiero mi almuerzo de sobras de lasaña, proclamo que la comida debe ser importante. Sin duda, pero no todos los organismos pueden comer lasaña, y me viene a la mente una clase entera de criaturas que no comen ningún

tipo de materia orgánica en absoluto, sino que simplemente fabrican sus células a partir de sustancias inorgánicas. Es lo que hacen las plantas, que crecen a partir de dióxido de carbono y agua y usan la energía del Sol para combinar esos compuestos produciendo biomasa celular y oxígeno.

También lo hacen muchos otros tipos de organismos, y la mayoría de ellos no usan el Sol como fuente de energía. En vez de eso, consiguen su energía promoviendo la reacción entre sustancias inorgánicas en las llamadas reacciones de oxidación-reducción, donde los electrones son transferidos durante la reacción. Para investigar esta idea más a fondo, pensemos en la sal. Si pones sal en agua, se disuelve en una reacción que genera energía, pero los organismos no pueden crecer usando la energía de esa reacción; no se transfieren electrones; y los átomos de cloro y sodio tienen la misma carga en los cristales de sal que en la solución. Ahora pensemos en las vacas. Las vacas albergan enormes poblaciones de microbios en su sistema digestivo, y muchos de ellos generan metano. Muchos de estos microbios, los llamados metanógenos, crecen sin problemas combinando hidrógeno gaseoso y dióxido de carbono para formar gas metano. No se usa luz, pero los electrones son transferidos, y los metanógenos son felices, como seguramente lo son las vacas. Por lo tanto, una necesidad básica para la vida es la energía, que puede ser aportada por la luz o por una infinidad de reacciones de oxidación-reducción diferentes.¹ Consideraremos estos asuntos con más detalle en el siguiente capítulo, pero de momento basta con subrayar que la energía es crucial para la vida.

La energía es indispensable, pero también necesitamos otras cosas. Las células están hechas de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo y azufre, como ingredientes principales, junto a un juego completo de metales minoritarios y otros elementos. Todos estos compuestos son cruciales para la construcción de componentes celulares básicos como la membrana celular, el material genético (ADN y ARN) y todas las proteínas y las demás moléculas que se usan para operar la maquinaria de la célula.

Otro ingrediente básico de la vida, al menos de la vida tal y como la conocemos, es un entorno acuoso estable. ¡La vida lo prefiere húmedo! Muchos organismos, desde luego, han evolucionado para vivir

fuera de la esfera acuosa de nuestro planeta, pero aun así necesitan agua para vivir. Nosotros también, solo que la empaquetamos dentro de nuestro cuerpo. De manera que, ya estemos hablando de cactus del desierto, arañas, serpientes, árboles o de las bacterias más diminutas, todos necesitan agua. De hecho, esta es una de las razones, como ya mencionamos antes, de que la búsqueda de vida en nuestro sistema solar y más allá de él sea equivalente a la búsqueda de agua líquida. «Un momento», podría objetar el lector, «he oído que algunas bacterias y pequeñas algas viven en agua marina congelada e incluso en los glaciares en ciertos casos». Muy cierto, pero, si el organismo está vivo y creciendo,² tiene acceso al agua líquida. En el caso del agua marina congelada, ello puede deberse a canales de salmuera formados excluyendo la sal del hielo en crecimiento; en los glaciares, la alta presión induce la fusión del hielo cerca del fondo, lo que aporta un entorno acuoso para los organismos. «Vale», podría añadir el lector, «pero he oído que la marca de temperatura para un organismo vivo ronda los 120 grados, muy por encima del punto de ebullición del agua en la superficie terrestre». Cierto de nuevo, pero esos organismos solo se encuentran a altas presiones, como en las profundidades oceánicas donde el punto de ebullición del agua excede el límite superior de temperatura para la vida.

¿Qué es tan importante sobre el agua, en cualquier caso? Para empezar, el agua tiene propiedades especiales. Debido a su estructura física, una molécula de agua es bipolar, lo que significa que está ligeramente cargada, con una carga positiva en un lado y una carga negativa en el lado opuesto. Esta condición le permite disolver cualquiera de las llamadas sustancias químicas iónicas (también cargadas), muchas de las cuales constituyen los bloques de construcción de la vida. Estos incluyen nutrientes como el nitrato, el amonio y el fosfato, que dan lugar a componentes cruciales del ADN, el ARN y las membranas celulares, así como una plétora de otras sustancias que incluyen el sulfato y una variedad de metales minoritarios que contribuyen a construir la maquinaria bioquímica de la célula. El agua no solo disuelve las sustancias, sino que estas sustancias también son transportadas por difusión y advección; y este movimiento proporciona un sistema por el que pueden ser distribuidas a las células. El agua tam-

bién aporta el medio por el que los productos de desecho son exportados de la célula.

La naturaleza bipolar del agua también permite la formación de membranas celulares. Estas separan el ambiente externo del interior de la célula donde se gestiona el negocio de la célula. Las membranas celulares están hechas de moléculas especiales (fosfolípidos) en las que un extremo contiene grupos químicos amantes del agua (hidrofilicos) y el otro grupos químicos repelentes del agua (hidrofóbicos). Al formar una membrana, la parte amante del agua se coloca hacia fuera, mirando a la fase acuosa, mientras que la parte repelente del agua se coloca hacia dentro, cara a cara con otra fila de partes repelentes de agua cuyas partes afines al agua se disponen hacia afuera en la dirección opuesta. Esta bicapa de lípidos se une en círculo formando la membrana celular que separa el interior de la célula del medio externo. En conjunto, desde su capacidad para disolver y transportar los constituyentes químicos de la vida, hasta su capacidad de albergar estructuras de membrana, hacen del agua una sustancia química única.

O quizá estemos pensando con poca perspectiva, demasiado centrados en la Tierra. El agua es el fluido de la vida porque sus propiedades son perfectas para el tipo de vida que conocemos. Tal vez un tipo diferente de vida podría haber evolucionado en solventes diferentes con propiedades diferentes. Es difícil descartar esta posibilidad. A veces se mencionan potenciales solventes alternativos. Estos incluyen el amonio, el metano, el ácido sulfúrico o el fluoruro de hidrógeno (FH); a las temperaturas y presiones adecuadas, comparten algunas de las propiedades del agua, aunque no todas. Aparte de numerosos libros y películas de ciencia ficción, hay también una literatura científica muy aciva sobre este tópico fascinante. Las discusiones sobre la vida en estas soluciones alternativas son, sin embargo, altamente especulativas, o incluso imaginativas, se podría decir. Por tanto, tomaré el camino fácil, y hasta donde podemos decir con certeza, el agua es el solvente único y perfecto para la vida.

En resumen, hemos subrayado tres ingredientes básicos para la vida. Son la energía, los componentes químicos que forman las células y el agua. Veremos a continuación que la disponibilidad de cada

uno de ellos está vinculada por las propiedades especiales del planeta Tierra.

Empecemos por el agua. No es ningún secreto que la Tierra es un planeta acuoso. Desde las fascinantes imágenes de nuestro «planeta azul» tomadas por la NASA desde el espacio hasta la *Rima del viejo marinero* de Samuel Taylor Coleridge, todo nos recuerda la extensión sin límites de los océanos globales. No nos ocuparemos en detalle de por qué la Tierra tiene tanta agua —probablemente una combinación de la temprana pérdida de gases desde su interior y el suministro directo de los cometas—, sino más bien de por qué el agua que tenemos es, bueno, acuosa. La respuesta, por supuesto, es que la mayor parte del planeta tiene la temperatura adecuada, entre los puntos de ebullición y congelación del agua. Pero ¿por qué? En esto, al menos en parte, somos afortunados. Podemos pensar en ello de la siguiente forma. La Tierra se sitúa a cierta distancia del Sol dictada por su órbita. Y el Sol tiene cierto brillo dictado por su tamaño y composición química.

La cantidad de calor del Sol interceptada por la Tierra depende de una combinación de esos dos factores. Sin embargo, como todos los planetas de nuestro sistema solar se calientan por el mismo Sol, consideremos la distancia al Sol como la variable clave. Es fácil imaginar que si la Tierra estuviera más cerca del Sol recibiría más calor, y menos calor si estuviera más lejos. Resulta que la Tierra reside a una distancia del Sol tal que el calor es suficiente para permitir la persistencia del agua líquida. Cuando un planeta está más cerca del Sol, como Venus, la temperatura se vuelve demasiado alta, y el agua líquida hierve y se evapora a la atmósfera en el llamado «efecto invernadero desbocado» (*runaway greenhouse*). Parte de esta agua puede incluso perderse por completo debido a procesos químicos en la estratosfera. Si el planeta está más lejos del Sol, como Marte, la superficie se vuelve demasiado fría y se congela. La zona situada a la distancia óptima del Sol (o de cualquier otra estrella, para el caso), donde puede persistir el agua líquida, se denomina «zona habitable», y a veces «zona Goldilocks».³

Pero la distancia al Sol es solo parte de la historia. La Tierra tiene una atmósfera con gases de efecto invernadero que contribuyen a calentar la superficie. Sin ningún efecto invernadero, y con el albedo de

la superficie tal y como es,⁴ la Tierra estaría congelada a unos 15 grados bajo cero. Por tanto, averiguar si un planeta está en la zona habitable es más enredado de lo arriba descrito. Ello requiere algunos cálculos bastante complejos sobre las transacciones de calor, que se empezaron a utilizar hace unas décadas; sin embargo, los modelos citados con más frecuencia fueron presentados en 1993 por Jim Kasting, de la Universidad Estatal de Pensilvania, junto con sus colaboradores Daniel Whitmire y Ray Reynolds. Jim ha sido un líder en aplicar su conocimiento detallado de la dinámica de la química atmosférica al entendimiento de la evolución tanto de la atmósfera terrestre como de la de otros planetas. Para abordar el asunto de la zona habitable Jim intentó, utilizando su modelo, mantener agua líquida en el planeta mediante cambios en los niveles de CO₂ (dióxido de carbono), ya que estos controlan el calentamiento por efecto invernadero. Es fácil imaginar que distintos niveles de CO₂ atmosférico serían necesarios para mantener la zona habitable en respuesta a diferencias de la luminosidad solar, que es básicamente la intensidad de la estrella, o del Sol en nuestro caso.

Con el modelo de Jim, el alcance exterior de la zona habitable se encuentra cuando las concentraciones de CO₂ atmosférico se vuelven tan altas que se forman nubes de CO₂. Estas nubes impiden que la radiación solar alcance la superficie del planeta, y por tanto incrementan el albedo planetario. El resultado final es un planeta congelado. Había otras consideraciones en el modelo de Jim que no trataré aquí, pero en definitiva Jim y sus colegas concluyeron que Marte queda probablemente justo fuera de la zona habitable. Por su parte, Venus queda también fuera de la zona habitable. En este caso, la luminosidad solar es simplemente demasiado alta. Incluso con unos niveles minúsculos de CO₂ atmosférico que aportan un mínimo calentamiento por efecto invernadero, la superficie del planeta se hace tan caliente que el agua se evapora a la atmósfera. Esta situación genera un efecto invernadero desbocado y unas temperaturas superficiales muy altas, ya que el agua es también un buen gas de efecto invernadero (¡y el más importante en la Tierra actual!).⁵ Según algunos cálculos de Jim, la frontera interior de la zona habitable puede situarse tan cerca como al 95 % de la distancia del Sol a la Tierra. Esto es más o menos 7,2 millones de

kilómetros más cerca del Sol de lo que estamos. Los resultados de los cálculos de Jim se presentan en la figura 1.1, y se tomen como se tomen significan que somos afortunados; la Tierra se sitúa ceñidamente en la zona habitable del Sol.

Si esto es cierto, ¿por qué seguimos contemplando la posibilidad de vida en Marte? En concordancia con los argumentos de Jim sobre la zona habitable, no hay evidencia de agua superficial permanente en

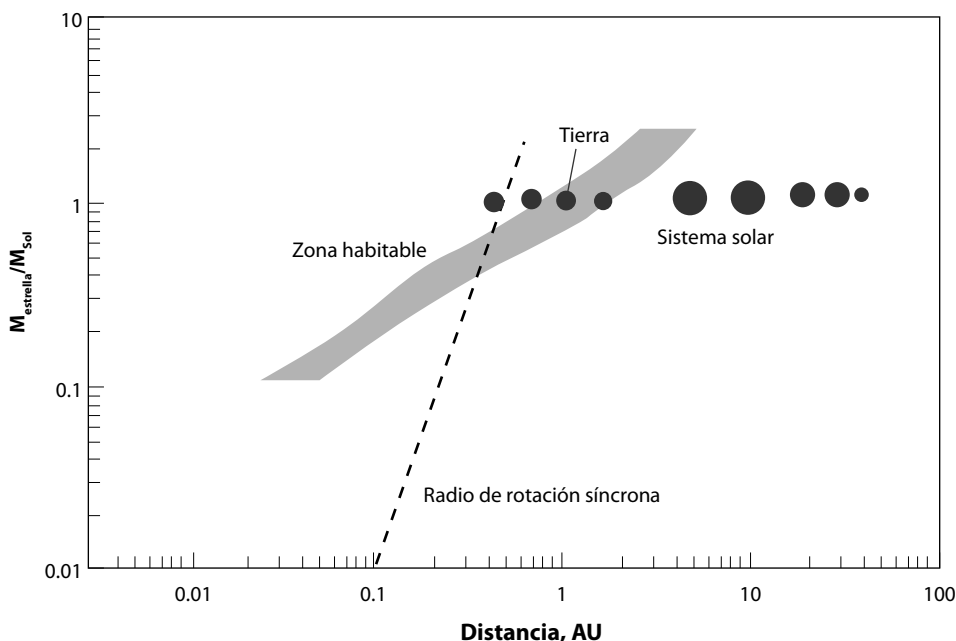


FIGURA 1.1 Zona de habitabilidad, según determinaron Jim Kasting y sus colegas. Se muestra la posición de los ocho planetas (más Plutón) de nuestro sistema solar. Una UA (unidad astronómica) es la distancia de la Tierra al Sol. El eje vertical muestra la proporción entre la masa de una estrella y la masa del Sol. A distancias de una estrella menores del radio de rotación sincrónica, los planetas resultan bloqueados en unas rotaciones alrededor de su eje que multiplican exactamente (por números enteros pequeños como 1, 2, 3, o por sus fracciones como $3/2$) el tiempo de rotación alrededor de la estrella (Mercurio rota 3 veces sobre su eje por cada 2 órbitas alrededor del Sol). En algunos casos, un planeta puede rotar una sola vez por cada periodo orbital, con la misma cara del planeta siempre mirando a la estrella. Los planetas que ocupan la zona habitable de una estrella pequeña están dentro del radio de rotación sincrónica.

Marte, al menos por ahora. Pero durante décadas de exploración por satélite y en superficie, incluidos los recientes y muy exitosos rovers *Spirit* y *Opportunity* de la Misión de Exploración por Rover (MER en sus siglas inglesas) y el sistema de imagen térmica de alta resolución THEMIS a bordo de la nave Mars Odyssey, el agua ha fluido y todavía fluye ocasionalmente en Marte. Las evidencias incluyen toda clase de canales, acequias, charcos y rocas sedimentarias cuya formación se puede explicar por la acción del agua. De hecho, el rover *Curiosity* ha aterrizado recientemente en la superficie de Marte y, mientras escribo esto, está explorando los alrededores de su lugar de aterrizaje, ¡que parece ser un antiguo lecho fluvial! Todo ello sumado a observaciones espectroscópicas de agua justo en y debajo de la superficie del suelo. Así, Marte demuestra que el agua líquida puede encontrarse, al menos ocasionalmente, un poco por fuera de la zona habitable. En contraste con la Tierra, sin embargo, cualquier vida que pueda haber en Marte, si es que existe, no es evidente y estaría aparentemente restringida en su ocurrencia y abundancia. Por tanto, Marte no sostiene ni puede sostener la magnitud de vida que encontramos en nuestro planeta.

Enterrada en la discusión sobre los cálculos de la zona habitable de Jim Kasting se halla la idea de que, a largas escalas de tiempo, la Tierra realmente regula su propia temperatura. Esta idea fue avanzada por primera vez por el cosmólogo Carl Sagan. Sagan hizo una gran contribución a nuestra comprensión de la composición de las atmósferas planetarias, y ayudó a enmarcar la discusión sobre la búsqueda de vida en el universo. Fue una enorme inspiración para las personas interesadas en la ciencia mediante su programa *Cosmos* de la PBS (Public Broadcasting System), emitido originalmente en 1980. De mayor importancia aquí, sin embargo, él y su colega George Mullen se preguntaron por qué la Tierra no se congeló al principio de su historia, cuando el Sol era mucho menos luminoso que hoy.⁶ Las evidencias geológicas apuntan a la presencia más o menos continua de agua líquida desde hace tanto como 4.200 millones de años. Sin embargo, con la abundancia actual de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre, el planeta se debería haber congelado bajo la escasa luminosidad del joven Sol. Esto se conoce como «la parado-

ja del joven Sol débil». Sagan y Mullen arguyeron que esa paradoja podría resolverse con una alta concentración de gases de efecto invernadero como amonio y metano; estos gases son inestables en nuestra atmósfera oxigenada actual, pero podrían haber estado presentes en la atmósfera pobre en oxígeno de la Tierra temprana. Poco después se puntualizó, no obstante, que el amonio habría sido inestable fotoquímicamente, incluso en una atmósfera libre de oxígeno. Esto generó un grave problema para el modelo. Sin embargo, en un verdadero salto cuántico intelectual, Jim Walker, Paul Hays y Jim Kasting percibieron que el CO_2 podría muy bien haber sido el gas de efecto invernadero que evitara la congelación de aquella joven Tierra. Muy bien, CO_2 entonces. Pero esta propuesta va mucho más allá, porque Walker, Hays y Kasting también demostraron un mecanismo que regula realmente la temperatura superficial.

La lógica es la siguiente. El dióxido de carbono es introducido constantemente desde el interior de la Tierra hacia la atmósfera. Ese CO_2 viene de los volcanes y de las fumarolas hidrotermales del fondo del océano. Sin embargo, si miramos con atención, vemos que esas fuentes de CO_2 , o al menos la mayoría de ellas, se originan como re-

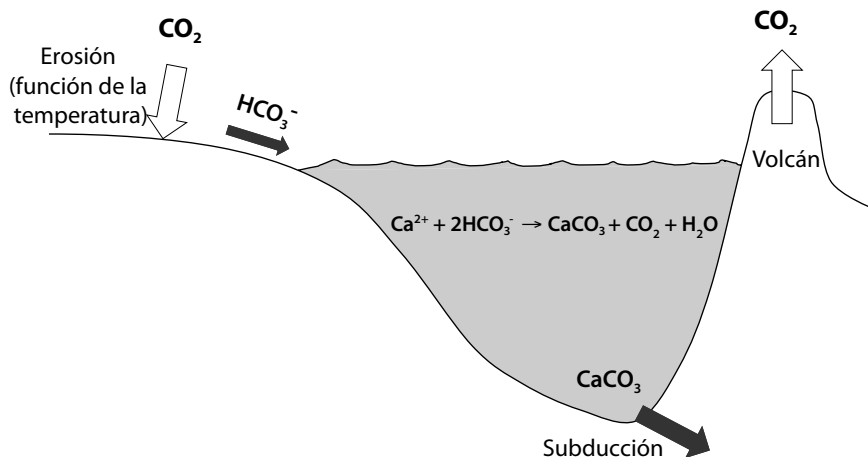


FIGURA 1.2 El ciclo del carbono actuando como regulador de la temperatura de la superficie de la Tierra. Redibujado a partir de Kasting (2010).

sultado de la continua agitación de la Tierra en un proceso conocido como «tectónica de placas». En la práctica, la pérdida de calor desde el interior de la Tierra (estimada en unos 5.000 grados en la zona media) causa que el manto (la capa situada inmediatamente debajo de la corteza terrestre) se mueva y se mezcle en el proceso denominado convección. Esta convección crea regiones de efusión volcánica, sobre todo en los océanos, que dividen la corteza terrestre en una serie de placas móviles que cabalgan sobre el manto subyacente. A medida que este proceso forma nuevo suelo oceánico, el suelo viejo va inyectándose de vuelta al interior del manto en el proceso denominado «subducción» (véase la figura 1.2). Este es un proceso violento que genera la mayoría de los grandes terremotos, y es el principal constructor de las cadenas montañosas. De modo que el CO_2 es liberado a la atmósfera, pero no se acumula allí para siempre. De hecho, es retirado activamente por un proceso conocido como «erosión química», donde el CO_2 reacciona con las rocas de la superficie terrestre.⁷ Un aspecto particularmente interesante de esta erosión es su sensibilidad a la temperatura: se acelera a temperaturas altas.

Con esto en mente, podemos empezar a imaginar cómo funciona la regulación de la temperatura a escala planetaria. Si la temperatura de la atmósfera se hace demasiado alta por alguna razón, la velocidad de la erosión se incrementará, y el CO_2 será retirado más activamente de la atmósfera. La remoción incrementada de CO_2 causará a su vez una caída de la concentración de CO_2 en la atmósfera, reducirá el calentamiento por efecto invernadero y, como resultado, la temperatura bajará. Por lo tanto, se alcanza un punto de equilibrio entre la concentración de CO_2 , la temperatura y la tasa de remoción del CO_2 por erosión. Supongamos que por alguna razón la Tierra se congela por completo. Esto puede haber ocurrido unas pocas veces a lo largo de la historia de la Tierra. Si ocurre, no tenemos que preocuparnos, al menos si consideramos grandes escalas de tiempo geológico. Los procesos tectónicos aseguran que el CO_2 será añadido continuamente a la atmósfera. Sin agua líquida, no habrá retirada de CO_2 por erosión, de modo que la concentración de CO_2 seguirá aumentando hasta que las temperaturas alcancen el punto en que el hielo se funde, y la erosión comenzará de nuevo.

Durante la erosión, el CO_2 se convierte en un ión soluble llamado bicarbonato (HCO_3^-), que precipita en forma de minerales como la calcita y la dolomita (como conchas de moluscos y arrecifes de coral, por ejemplo) en los océanos. Estos minerales se descomponen para dar de nuevo CO_2 durante los procesos de subducción, lo que completa el ciclo. Resumiendo, por tanto, a través del ciclo de las rocas, la Tierra tiene un mecanismo activo de control de la temperatura, operado por los movimientos del manto y los procesos asociados de la tectónica de placas. Por tanto, la tectónica de placas es también crucial para permitir a la Tierra disfrutar de un suministro continuo de agua líquida a lo largo de la mayor parte de su larga historia.

Esta es una historia preciosa, pero ¿es cierta? Yo creo que debe serlo, al menos a grandes rasgos. Algunas evidencias geológicas, sin embargo, apuntan a concentraciones de CO_2 en la Tierra primitiva demasiado bajas como para calentar una Tierra iluminada por aquel Sol poco poderoso.⁸ De nuevo Jim Kasting ha entrado en la discusión remontándose a Sagan y Mullen, al sugerir que el metano puede haber sido un importante gas de efecto invernadero en la historia temprana de la Tierra. Esto ayudaría a explicar las bajas concentraciones de CO_2 .⁹ Puede ser cierto, pero el ciclo del metano por sí mismo no conduce a un control de temperatura robusto de forma tan obvia como el CO_2 . Muy recientemente, Minik Rosing y sus colegas (encontraremos a Minik de nuevo en el capítulo 7) han argumentado que tal vez hayamos estado enfocando el problema de manera incorrecta. Sugieren, de hecho, que tal vez el albedo de la Tierra joven era mucho más bajo que hoy,¹⁰ de modo que quizá no fuera necesario tanto gas de efecto invernadero para calentar el planeta. A Jim Kasting no le vuelve loco esta idea, pero unas concentraciones más bajas de CO_2 atmosférico pueden satisfacer tanto las evidencias geológicas sobre los niveles antiguos de CO_2 y producir el suficiente efecto invernadero para calentar el planeta en presencia de un débil Sol joven. Por lo tanto, el mecanismo de control por CO_2 tal y como fue descrito originalmente por Walker y Kasting puede todavía funcionar para regular la temperatura de la Tierra a lo largo del tiempo, incluso si los niveles primitivos de CO_2 fueron menores de lo que pensábamos.

Ahora volvamos a nuestra cuestión original. Una cosa es tener agua, y otra muy distinta sustentar una biosfera abundante. Como se mencionó al principio de este capítulo, la vida está por casi todas partes en la superficie de la Tierra. Pero ¿cómo la sustenta nuestro planeta? Intentemos hacer algunos cálculos. La vida fotosintética en la Tierra, funcionando a las presentes tasas de fotosíntesis, consumirían todo el CO_2 de la atmósfera en nueve años.¹¹ Asimismo, la vida fotosintética de los océanos consumiría todo el fósforo disponible, un nutriente clave para las plantas acuáticas y las algas, en solo 86 años.¹² Siendo así, ¿cómo podemos sustentar tanta vida durante largas escalas de tiempo? Parte de la respuesta es que la mayor parte del CO_2 y de los nutrientes vinculados a las plantas y algas son liberados de vuelta a la atmósfera a medida que estos organismos mueren y son consumidos y descompuestos por toda clase de criaturas desde pandas gigantes hasta bacterias. Bien, pero aun así hay parte del material de las plantas y del fósforo que no se devuelve al entorno, sino que se entierra en sedimentos y acaba formando parte de las rocas. Si rehacemos nuestros cálculos para tomar en cuenta estas tasas de pérdida, encontramos que el CO_2 sería consumido en 13.000 años,¹³ y el fósforo en 29.000 años. Estas son todavía unas escalas de tiempo comparadas con los miles de millones de años que la vida ha perdurado en el planeta y los cientos de millones de años en que las plantas y los animales han poblado tierra firme. ¿Cómo explicamos esto?

La respuesta es realmente muy simple. Recurrimos a los mismos procesos tectónicos que usamos para explicar el papel del CO_2 cuando resolvimos la paradoja del débil Sol joven. Afortunadamente, cuando los materiales son secuestrados en sedimentos marinos en la Tierra, no se quedan atrapados allí permanentemente. Los movimientos tectónicos del planeta así lo aseguran. Mediante los procesos de subducción, levantamiento de montañas y cambio del nivel del mar (el nivel del mar es influido tanto por la tectónica como por el clima), la mayoría de esos materiales acaban exponiéndose de nuevo al entorno erosivo. Durante la erosión, la materia orgánica vuelve a convertirse en CO_2 , el fósforo se libera de nuevo como solución, y una plétora de otros ingredientes para la vida vuelve a estar disponible para sustentar el crecimiento de los organismos. La clave aquí es que la magnitud de

vida que disfrutamos en la Tierra es posible por el reciclaje activo de los constituyentes de la vida por procesos tectónicos. Esto fue reconocido por primera vez hace más de 200 años por James Hutton, a quien ya encontramos en el prefacio. Escribió en su tratado *Teoría de la Tierra* (1788):

El fin de la naturaleza al situar un fuego interno o poder de calor, y una fuerza de expansión irresistible, en el cuerpo de esta Tierra, es consolidar el sedimento recolectado en el fondo del mar, y formar de allí una masa de tierra permanente por encima del nivel del océano para el mantenimiento de plantas y animales.

Por último, ¿qué hay de la energía? Diré mucho más sobre la energía en el siguiente capítulo, sobre todo acerca de los tipos de energía necesarios para la vida, en muchos de los cuales no pensamos normalmente. En la Tierra moderna, sin embargo, la mayoría (probablemente más del 99%) de la energía de la biosfera viene en último término del Sol, alimentando la fotosíntesis de las plantas, las algas y los microbios (conocidos como cianobacterias; veremos mucho más sobre ellos en capítulos posteriores) que producen materia orgánica y oxígeno. Estos productos de la fotosíntesis son recombinados biológicamente en las grandes cadenas alimenticias de la Tierra. Por ejemplo, los copépodos del océano comen algas, los peces pequeños se comen a los copépodos, los peces grandes se comen a los pequeños, y peces aún más grandes se comen a aquellos. Estos peces mueren y se descomponen por la acción de una variedad de bacterias, que a su vez son consumidas por otros organismos. La cadena sigue y sigue, pero es alimentada, en último término, por la materia orgánica y el oxígeno producidos por la fotosíntesis. Como se describió más arriba, sin embargo, los organismos que producen el oxígeno y alimentan la biosfera obtienen sus bloques de construcción de material reciclado mediante la tectónica de placas. Por tanto, mientras que el Sol aporta la energía, la tasa a la que la tectónica recicla los componentes biológicos básicos establece el *tempo*.

Visto todo, debemos admitir que la Tierra es un lugar maravilloso para la vida. Se sitúa cómodamente dentro de la zona habitable del

Sol. Además, su activa tectónica controla la temperatura del entorno de superficie, al aportar un suministro continuo de agua líquida, y también recicla los componentes básicos requeridos para estimular una vida abundante. Como veremos en el siguiente capítulo, la misma tectónica puede también haber generado unas condiciones óptimas para la primera biosfera.